

Master-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering

Entwicklung und Inbetriebnahme eines Messsystems zur Bestimmung der Flussdichteverteilung konzentrierter Solarstrahlung



Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg
University of Applied Sciences



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Vorgelegt von: Benjamin Wittenberg
Theodor-Heuss-Ring 24
53840 Troisdorf
Matr. Nr.: 9013673
Email: benny.witti@gmail.com

Fachbereich: Elektrotechnik, Maschinenbau
und Technikjournalismus

Studiengang: Mechatronik

Erstgutachter: Prof. Dr. -Ing. D. Franke
Zweitgutachter: Prof. Dr. -Ing. I. Groß
Betreuer DLR e.V.: Dr. T. Fend

Eingereicht am: 05.12.2014

Eidesstaatliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die von mir vorgelegte Arbeit

Entwicklung und Inbetriebnahme eines Messsystems zur Bestimmung der Flussdichteverteilung konzentrierter Solarstrahlung

selbstständig und ohne zusätzliche Hilfsmittel verfasst habe. Die Verwendung der Gedanken anderer Autoren ist an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit kenntlich gemacht. Weiterhin sind alle genutzten Quellen und Literaturstellen vollständig angegeben. Diese Arbeit wurde bisher bei keiner anderen Prüfung vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei jenen zu bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben und mich auf dem Weg zum Ergebnis dieser Masterthesis unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Prof. Dr. Dieter Franke von der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg für die Betreuung, das rege Interesse und die konstruktiven Ratschläge an meiner Arbeit, sowie dem Betreuer, Herrn Dr. Thomas Fend, vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Den Mitarbeitern des DLR, die mir mit Ihrem Wissen bei Fragen und fachlichen Problemen jeglicher Art immer hilfsbereit zur Seite standen, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls meinen Dank aussprechen.

Das abschließende Dankeschön gilt meiner Ehefrau Marina Wittenberg, die mich in jeglicher Art während des gesamten Studiums und speziell während der Masterthesis unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	x
Nomenklatur	xi
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung solarthermischer Stromerzeugung	1
1.2 Solarturmkraftwerk des DLR	3
1.3 Testreceiver-Anlage	4
2 Grundlagen	6
2.1 Strahlung	6
2.1.1 Strahlungsphysikalische Größen	6
2.1.2 Reflexionseigenschaften realer Oberflächen	8
2.1.3 Solarstrahlung	9
2.2 Entwicklungsumgebung LabVIEW	10
2.2.1 Aufbau	10
2.2.2 Vor- und Nachteile	12
2.3 Solarturm Jülich	13
2.3.1 Aufbau des Solarturms	13
2.3.2 Aufbau des Heliostatfeldes	15
3 Ausgangssituation	16
3.1 Messverfahren	16
3.2 Anforderungen	17
3.3 Entwicklung der Movingbar	18

3.3.1	Konstruktion	18
3.3.2	Antrieb	19
3.3.3	Kühlkonzepte	20
3.4	Auswahl der Systemkomponenten	21
3.4.1	Radiometer	21
3.4.2	Targetbeschichtung	22
3.4.3	Kamerasystem	23
4	Aufgabenstellung	24
4.1	Ziel der Arbeit	24
4.2	Vorgehensweise	25
5	Entwicklung weiterer Systemkomponenten	26
5.1	Temperaturüberwachung	26
5.1.1	Temperatursensoren	26
5.1.2	Messstellen	27
5.1.3	Signalwandlung	28
5.2	Flussdichtemessung	28
5.2.1	Einbau des Radiometers	28
5.2.2	Signalwandlung	29
5.3	Kühlung der Movingbar	30
5.3.1	Bestrahlungstest mit bestehendem Kühlsystem	30
5.3.2	Weiterentwicklung des Kühlsystems	31
5.3.3	Bestrahlungstest mit optimiertem Kühlsystem	33
5.4	Kühlung des Radiometers	34
5.4.1	Aufbau des vorgesehenen Kühlsystems	34
5.4.2	Bestrahlungstest mit vorgesehenem Kühlsystem	35
5.4.3	Weiterentwicklung und Bestrahlungstest mit optimiertem Kühlsystem	36
5.5	Integration der Kamera	36
5.6	Aufbau des Messsystems	37
5.7	Neigungswinkel des Targets	39
6	Programmierung des Messsystems	44

6.1	OPC-Server	44
6.2	Bedienoberfläche im Frontpanel	45
6.2.1	Reiter Systemüberwachung	46
6.2.2	Reiter Kamerabild	48
6.2.3	Reiter Systemkalibration	50
6.2.4	Reiter Messfahrt	51
6.3	Programmierung im Blockdiagramm	52
6.3.1	Programmstruktur	52
6.3.2	Programmablauf	55
6.3.3	Umgesetzte Sicherheitsvorrichtungen	61
6.4	Auswertungsalgorithmus in Matlab	62
6.4.1	Programmablaufplan	63
6.5	Fehlerkorrekturen	65
6.5.1	Ungenauigkeit der lokalen Flussdichtemessung	65
6.5.2	Dunkelstrom	65
6.5.3	Grauwertstreuung in der Grauwertkalibration	67
7	Genauigkeit des Messsystems	68
7.1	Target	68
7.1.1	Winkelabhängigkeit des Reflexionsgrads	68
7.2	Kamera	71
7.2.1	Linearität	71
7.2.2	Dunkelstrom	72
7.2.3	Shading	72
7.3	Gesamtbetrachtung	74
8	Zusammenfassung	76
9	Ausblick	77
9.1	Weiterentwicklung des Messsystems	77
9.1.1	Erhöhung des Automatisierungsgrades	77
9.1.2	Verbesserung der Sicherheitsvorrichtungen	77
9.2	Verbesserung der Messgenauigkeit	78
A	Anhang	I

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prognose des Weltenergieverbrauchs nach Energieträgern [1]	1
1.2	Funktionsprinzip der Strahlungskonzentration eines Parabolrinnenkraftwerks [2]	2
1.3	Funktionsprinzip der Strahlungskonzentration eines Solarturmkraftwerks [3]	2
1.4	Prognose der kumulierten Kraftwerksleistung solarthermischer Kraftwerke [4]	3
1.5	Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich [5]	4
1.6	Bestrahlte Forschungsebene des Solarturms in Jülich	4
1.7	Rückansicht des Testreceivers auf der Forschungsebene	5
1.8	Vorderansicht des Testreceivers	5
2.1	Definition der sphärischen Koordinaten	6
2.2	Definition des Raumwinkels	6
2.3	Spiegelnde Reflexion	8
2.4	Diffuse Reflexion	8
2.5	Spektrale Direktstrahlungsverteilung bei verschiedener Luftmasse [6] . .	9
2.6	Beispielprogramm mit Frontpanel (links) und Blockdiagramm (rechts) .	11
2.7	Aufbau des Solarturms [7]	14
2.8	Aufbau des Heliostatfeldes [8]	15
3.1	Funktionsprinzip der Kamera-Target-Methode [5]	16
3.2	Konstruktion der Movingbar	18
3.3	Aufbau eines Linearantriebs mit Kugelgewindetrieb[9]	19
3.4	Luftkühlung der Movingbar mit Anschlüssen und Kühlkanälen	21
3.5	Wassergekühltes Radiometer: Sequoia Vatel TG1000-0 [10]	21
3.6	Prinzipskizze eines Gardon-Radiometers	22

3.7	Ethernet-Kamera: AVT Prosilica GT2000 [11]	23
5.1	Mantelthermoelement Typ K mit Übergangshülse und Stecker [12] . . .	26
5.2	Universelles Messmodul: Gantner instruments e.bloxx A1-1 [13]	28
5.3	Gantner instruments e.bloxx Terminal CJC [14]	28
5.4	Einbauposition des Radiometers auf der Movingbar	29
5.5	Messumformer Knick ThermoTrans A 20210 [15]	29
5.6	Temperaturentwicklung beim Bestrahlungstest vom 02.06.2014	30
5.7	Temperaturentwicklung beim Bestrahlungstest vom 03.06.2014	32
5.8	Position des Gebläses inkl. Schlauchführung	33
5.9	Schlauchende an der Seitenöffnung der Movingbar	33
5.10	Temperaturentwicklung beim Bestrahlungstest vom 31.07.2014	34
5.11	Kühlkreislauf und Sensorik im Innern der Movingbar	35
5.12	Kameramast mit aufgeschraubtem Kameragehäuse	36
5.13	Aufbau des Messsystems im Heliostatfeld	38
5.14	Aufbau des Messsystems auf der Forschungsebene	39
5.15	Flussdichtemessung mit geneigtem Target	40
5.16	Doppelte Detektion von Solarstrahlung	40
5.17	Unterlassene Detektion von Solarstrahlung	40
5.18	Relativer Fehler der detektierten Solarstrahlung in Abhängigkeit zum Einstrahlwinkel bei 10 Einzelaufnahmen	42
5.19	Senkrechtes Target nach Umbau der Movingbar	42
5.20	Flussdichtemessung mit senkrechtem Target	43
6.1	Funktionsweise eines OPC-Servers	45
6.2	Blockdiagramm: Kommunikation mit Umgebungsvariablen	46
6.3	Bedienoberfläche des Messsystems	47
6.4	Reiter "Kamerabild" mit eingeschaltetem Belichtungszeitassistent . . .	48
6.5	Reiter "Kamerabild" mit aktivierter Falschfarbendarstellung	48
6.6	Linearität der Prosilica GT2000	49
6.7	Kalibration der Kameraposition im Reiter "Systemkalibration"	50
6.8	Grauwertkalibration im Reiter "Systemkalibration"	50
6.9	Durchführung einer Messfahrt im Reiter "Messfahrt"	52
6.10	Darstellung der Flussdichtverteilung im Reiter "Messfahrt"	52

6.11	Aufbau zur Erfassung einer Buttonbetätigung mit Ereignisstruktur . .	53
6.12	Entwurfsmuster einer parallelen Schleifenstruktur mit Synchronisation .	54
6.13	Programmablauf von Schleife 1	56
6.14	Programmablauf des Timeout-Case	57
6.15	Programmablauf von Schleife 2	59
6.16	Blockdiagrammausschnitt: Ereigniscase Parkposition	62
6.17	Blockdiagrammausschnitt: Ende des Fehler-Clusters in Schleife 1	62
6.18	Blockdiagrammausschnitt: Ende des Fehler-Clusters in Schleife 2	62
6.19	Blockdiagrammausschnitt: Start des Matlab-Auswertungsalgorithmus .	63
6.20	Programmablaufplan der Matlabroutine	64
6.21	Ungenauigkeit in der Flussdichtemessung	65
6.22	Grauwerte auf einer vertikal verlaufenden Linie aus einer Messung mit verschlossenem Objektiv	66
6.23	Grauwert eines Pixels in 10 aufeinanderfolgenden Aufnahmen	66
6.24	Dunkelstromkompensation im LabVIEW Blockdiagramm	66
6.25	Streuung der Grauwerte	67
7.1	Winkelabhängigkeit der Reflexion bei einem Beobachtungswinkel von 0°	69
7.2	Winkelabhängigkeit der Reflexion bei einem Beobachtungswinkel von 40°	69
7.3	Einstrahlwinkel der Heliostate inkl. Position der Kamera im Feld	70
7.4	Linearität der Prosilica GT2000 mit Linearitätsabweichung	71
7.5	Aufnahme aus eine Ulbricht-Kugel mit erhöhtem Kontrast	72
7.6	Grauwertentwicklung im Bereich des Testreceivers	73
7.7	Auswertungsausschnitt mit erhöhtem Kontrast inkl. eingezeichneten Ka- librierpositionen	74

Tabellenverzeichnis

2.1	Bestrahlungsstärke und Elevationswinkel ausgewählter Luftmassen . . .	10
3.1	Eigenschaften des Kamerasystems [11]	23
5.1	Eigenschaften des Mantelthermoelements Typ K [16][17]	27
7.1	Fehlerquellen und Gesamtfehler des Messsystems	75

Nomenklatur

Abk.	Bezeichnung	Einheit
a	Ausschnitthöhe der Targetaufnahme	mm
A_2	Strahlungsempfangende Fläche	m^2
A_n	Teiloberfläche einer Kugel	m^2
A_{\perp}	Fläche senkrecht zur Einstrahlung	m^2
b	Fehlerfreier Anteil der Strahlung	mm
b_r	Breite des Testreceivers	m
B	Fehlerhafter Anteil der Strahlung	mm
c	Abstand zwischen den Positionen der Movingbar	mm
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$J/kg \cdot K$
D	Strahlungsflussdichte	kW/m^2
D_1	Strahlungsflussdichte des 1. Kalibrierpunktes	kW/m^2
D_2	Strahlungsflussdichte des 2. Kalibrierpunktes	kW/m^2
D_m	Mittlere Strahlungsflussdichte	kW/m^2
D_r	Gemessene Strahlungsflussdichte des Radiometers	kW/m^2
E	Bestrahlungsstärke	kW/m^2
E_0	Solarkonstante	kW/m^2
F_r	Relativer Fehler	$\%$
$\Delta F_{t,s}$	Fehler durch winkelabhängige Reflexion	$\%$
$\Delta F_{t,s}$	Gesamtfehler	$\%$
g_1	Grauwert des 1. Kalibrierpunktes	-
g_2	Grauwert des 2. Kalibrierpunktes	-
GW_m	Mittelwert der Grauwerte	GW
GW_k	Kalibriergrauwerte	GW
h_r	Höhe des Testreceivers	m
i	Zähler für die aktuelle Spalte	-
i_{max}	Maximale Spaltenanzahl	-
I_e	Strahlstärke	W/sr
I_{norm}	normierte Strahlstärke	-
I_r	Stromsignal des Radiometers	mA
j	Zähler für die aktuelle Zeile	-
j_{max}	Maximale Zeilenanzahl	-
k	Kalibrierfaktor	$kW/m^2/GW$
L	Strahldichte	$W/m^2 \cdot sr$
m	Masse	kg
Q	Strahlungsenergie	J

r	Kugelradius	m
S_i	Integral der normierte Strahlstärke	-
S_c	Integral der Kosinus-Kurve	-
t	Zeit	s
ΔT	Temperaturdifferenz	C
U_r	Spannungssignal des Radiometers	mV
α	Elevationswinkel der Kamerablickrichtung	$^\circ$
β	Elevationswinkel der Heliostatstrahlung	$^\circ$
φ	Azimutwinkel	$^\circ$
φ_r	Azimutwinkel des reflektierten Strahls	$^\circ$
Φ	Strahlungsfluss	W
ρ	Reflexionsgrad	-
ρ_t	Reflexionsgrad der Targetbeschichtung	-
σ	Standardabweichung	-
σ_d	Standardabweichung des Dunkelstroms	$\%$
θ	Elevationswinkel	$^\circ$
θ_r	Elevationswinkel des reflektierten Strahls	$^\circ$
θ_s	Elevationswinkel der Sonne	$^\circ$
Ω	Raumwinkel	sr

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Bedeutung
AM	air mass (Luftmasse)
CCD	charged coupled device
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor
CSP	concentrated solar power (Konzentrierte Solarstrahlung)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
GS	Graustufen
GW	Grauwert
INDUSOL	Industrialisierung von keramischen Solarkomponenten
LED	light-emitting diode (Leuchtdiode)
OPC	object linking and embedding for process control
PC	personal computer
SiBops	Simulationsunterstützte Betriebsoptimierung für Solarturmkraftwerke
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VI	Virtuelles Instrument

1 Einleitung

1.1 Bedeutung solarthermischer Stromerzeugung

Der weltweite Energiebedarf steigt kontinuierlich an. Zurückzuführen ist dies auf die stetig zunehmende Weltbevölkerung, bei gleichzeitigem Wachstum des Wohlstandes in Entwicklungs- und Schwellenländern. Während der Weltenergieverbrauch 2011 noch bei 12300 Mtoe (Mio. Tonnen Öleinheit) lag, was einem Wert von 511 EJ/Jahr entspricht, soll dieser laut einer BP Studie im Jahr 2030 um 36 % auf 16,7 Mtoe angestiegen sein (siehe Abb. 1.1). Die Deutsche Energie-Agentur prognostiziert gar einen Anstieg bis 2030 um mindestens 60 % [18]. Diese Energie auch in Zukunft zu großen Teilen aus den fossilen Energieträgern Öl, Gas und Kohle zu gewinnen sollte vermieden werden. Zum einen wird hierbei in großen Mengen das Treibhausgas CO_2 freigesetzt, welches entscheidend die Erderwärmung vorantreibt. Zum anderen stehen die Vorräte der fossilen Energieträger nur begrenzt zur Verfügung, bei einer deutlichen Konzentration der Ressourcen in Ländern des mittleren Ostens [18]. Des Weiteren ist bei der enormen Ölpreisentwicklung der letzten 15 Jahre keine Trendwende erkennbar, speziell vor dem Hintergrund der immer knapper werdenden Rohstoffe und der angespannten politischen Lage in einigen Förderländern. Atomstrom scheint mit Blick auf das ungelöste Endlagerproblem und dem hohen Gefahrenpotential im Störfall auch keine Alternative für die Zukunft zu sein.

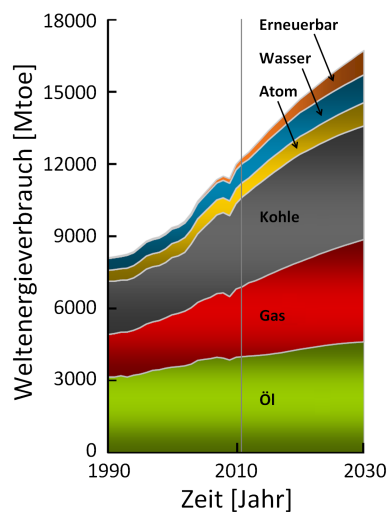


Abbildung 1.1: Prognose des Weltenergieverbrauchs nach Energieträgern [1]

Umso bedeutender wird aus diesem Grund die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die unerschöpflich sind, je nach Erdregion frei verfügbar und zudem keine Treibhausgase erzeugen. Neben anderen Technologien zählt hierzu die Solarthermie, welche in der Lage ist das immense Potential der Sonnenenergie zu nutzen. Hierbei wird die Sonnenstrahlung mit konzentrierenden Spiegelsystemen gebündelt und auf einen Strahlungsempfänger gerichtet, um ein darin befindliches Arbeitsmedium zu erhitzen. Auf diese Weise wird Sonnenlicht in Wärme umgewandelt, die anschließend in einen konventionellen Kraftwerksprozess eingekoppelt wird, um über eine mit Wasserdampf betriebene Turbine Strom zu erzeugen. Bei der technischen Umsetzung muss zwischen zwei kommerziell genutzten Kraftwerkstypen unterschieden werden. Beim Parabolrinnenkraftwerk wird das Sonnenlicht durch lange parabelförmige Spiegel auf ein in der Brennnlinie verlaufendes Absorberrohr fokussiert (siehe Abb. 1.2). Den Hauptanteil der solarthermischen Stromerzeugung liefern derzeit Kraftwerke diesen Typs. Beim Solarturmkraftwerk wird das Sonnenlicht hingegen durch eine Vielzahl von Einzelspiegeln (Heliostate) auf einen Strahlungsempfänger, auch Receiver genannt, fokussiert, welcher sich an der Spitze des Turms befindet (siehe Abb. 1.3). Als Standorte eines solarthermischen Kraftwerks kommen lediglich die sonnenreichen Zonen der Erde in Frage, da nur der direkte Anteil der Sonnenstrahlung genutzt werden kann. Als direkte Sonnen- oder Solarstrahlung wird im Gegensatz zur diffusen Strahlung der Teil verstanden, der keine Streuung durch das Auftreten von Wolken oder Nebel erfährt. Wolkenarme Regionen wie Südeuropa, Kalifornien, Nord- und Südafrika, Naher Osten oder Australien eignen sich demnach in besonderer Weise. Deutschland hingegen ist mit seiner nördlichen Lage und den damit einhergehenden niedrigen Jahresmengen an direkter Solarstrahlung nicht für den wirtschaftlichen Einsatz eines solchen Kraftwerks geeignet. [19]

Die Zunahme der Bedeutung dieser alternativen Energieerzeugung lässt sich auch in der Entwicklung der installierten Kraftwerksleistung ermitteln, die aktuell durch eine attraktive staatliche Förderung in den USA und Spanien vorangetrieben wird. Während Mitte 2012 bereits Kraftwerke mit einer kumulierten Leistung von 2000 MW installiert waren, erhöht sich diese Leistung durch die im Bau oder in Planung befindlicher Anlagen bis 2015 auf 5 GW [4]. In Abbildung 1.4 ist zu erkennen, dass das Fraunhofer-

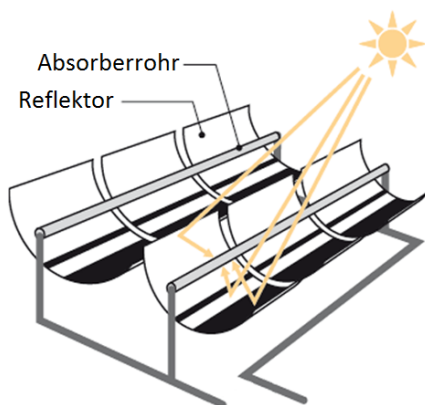


Abbildung 1.2: Funktionsprinzip der Strahlungskonzentration eines Parabolrinnenkraftwerks [2]

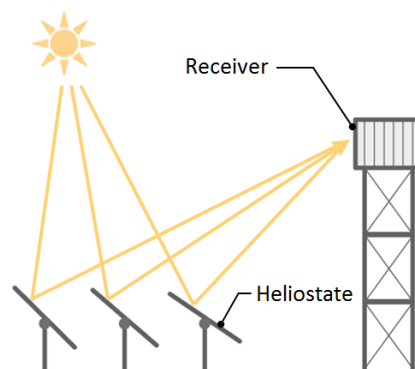


Abbildung 1.3: Funktionsprinzip der Strahlungskonzentration eines Solarturmkraftwerks [3]

Institut für solare Energiesysteme bis 2030 einen enormen Anstieg der Kraftwerke auf Basis konzentrierter Solarstrahlung (engl. concentrated solar power, CSP) prognostiziert. [4]

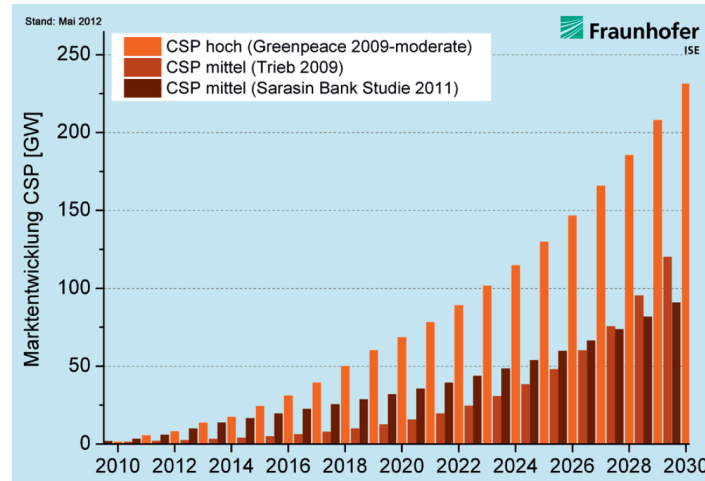


Abbildung 1.4: Prognose der kumulierten Kraftwerksleistung solarthermischer Kraftwerke [4]

1.2 Solarturmkraftwerk des DLR

Bedingt durch den raschen Ausbau und die vergleichsweise hohen Stromgestehungskosten der solarthermischen Kraftwerke ist es notwendig den Wirkungsgrad und damit die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen zu verbessern. Das deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) hat hierfür im Jahr 2011 am Standort Köln das Institut für Solarforschung gegründet, welches in seiner Forschung die Effizienzsteigerung und Kostensenkung von konzentrierenden Solarsystemen in den Mittelpunkt gestellt hat. Als führende und richtungsweisende Forschungseinrichtung hat das Institut in Europa einen maßgeblichen Anteil in der Entwicklung und Qualifizierung zugehöriger Technologien. Die 140 Mitarbeiter des Instituts arbeiten am Hauptsitz in Köln, in Stuttgart, sowie in Jülich und im spanischen Almería, dem größten europäischen Testzentrum für Solartechnologie. Neben Forschungsschwerpunkten wie die Erschließung neuer Wärmeträgerfluide oder die Nutzung der Sonnenstrahlung in der chemischen Verfahrenstechnik entwickeln die Wissenschaftler auch, gemeinsam mit der Industrie, Lösungen für anwendungsorientierte Forschungsaufgaben auf dem Gebiet der Turmtechnologie. Konkretes Forschungsprojekt ist beispielsweise die Weiterentwicklung des sogenannten volumetrischen Luftreceivers, indem die Kontaktoberfläche zwischen dem heißen Receiver und der durchströmenden, als Arbeitsmedium genutzten Luft, vergrößert wird. Um diese Forschungsarbeiten in unmittelbarer geographischer Nähe und in einer realen Kraftwerks Umgebung durchführen zu können betreibt das DLR das solarthermische Versuchskraftwerk in Jülich (siehe Abb. 1.5). Auf einer Fläche von zehn Hektar stehen hier 2153 bewegliche Heliostate und lenken das konzentrierte Sonnenlicht auf den Receiver, der sich an der Spitze des 60 m hohen Solarturms befindet. Dieser heizt sich

infolge dessen auf bis zu $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Der Receiver wiederum besteht aus einer Vielzahl einzelner Receivercups, die von Umgebungsluft durchströmt werden. Die angesaugte, bis zu $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ heiße Luft wird daraufhin in ein Kreislaufsystem eingeleitet, um Wasserdampf zu erzeugen. Dieser Dampf treibt letztlich eine Kraftwerksturbine an mit der über einen Generator eine Nennleistung von $1,5\text{ MW}$ produziert werden kann. [20]



Abbildung 1.5: Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich [5]

1.3 Testreceiver-Anlage

Auf halber Höhe des Turms ist im Rahmen der Errichtung des Kraftwerks eine Forschungsebene entstanden, auf der parallel zur Bestrahlung des Hauptreceivers Experimente im Leistungsbereich bis 1000 kW durchgeführt werden können (siehe Abb. 1.6). Mit einer Fläche von 80 m^2 und einer Höhe von 3 m lassen sich hier auch komplexere Versuchsaufbauten realisieren. Zudem ist in Form eines separaten Vorbereitungsraumes der Schutz der Wissenschaftler vor konzentrierter Strahlung sichergestellt. Dieser befindet sich auf derselben Etage und ist mit PC-Arbeitsplätzen ausreichend ausgestattet, um sowohl Wetterdaten und Forschungsebene zu überwachen, als auch die Versuchsanlage und zugehörige Messeinrichtungen zu bedienen. [21]



Abbildung 1.6: Bestrahlte Forschungsebene des Solarturms in Jülich

Im Oktober des letzten Jahres ist auf der Forschungsebene eine Receiver-Testanlage installiert worden (siehe Abb. 1.7 und 1.8). Die Anlage, bestehend aus Receiver und Luftkreislauf, weist die gleichen Betriebsbedingungen auf, wie sie in einem kommerziellen Solarturmkraftwerk vorhanden sind. Im Receiver, der auf maximal 750 kW Bestrahlungsleistung ausgelegten Anlage, können 54 Absorbercups einer Spitzeneinstrahlung von 1000 kW/m^2 ausgesetzt werden. Die Breite der Receiverfläche beträgt 0,865 m bei einer Höhe von 1,3 m. Mit Hilfe dieses Testreceivers soll eine neue Generation von Receivercups umfangreichen Tests unterzogen werden mit dem Vorteil diese schnell und einfach zu wechseln oder nachträgliche Modifikationen vornehmen zu können. Die gewonnenen Ergebnisse sollen direkt in die Konzeption zukünftiger Kraftwerke in Südsanien und Nordafrika einfließen.

Wichtiger Bestandteil dieser Versuchsreihe ist ein Messsystem zur Bestimmung der solaren Strahlungsflussdichtverteilung. Benötigt wird dieses System in erster Linie zur Ermittlung der Eingangsleistung und anschließenden Berechnung des Wirkungsgrades, um die unterschiedlichen Receivercups vergleichen und entscheidend optimieren zu können. Zusätzlich kann anhand der Strahlungsverteilung das Heliostatfeld ausgerichtet und gewährleistet werden, dass Einstrahlungsgrenzwerte nicht überschritten werden. Unabhängig vom Testreceiver soll das Messsystem im Anschluss zum festen Inventar der Forschungsebene gehören, um auch in Zukunft Strahlungsflussdichtmessungen an folgenden Versuchen durchführen zu können. [22]



Abbildung 1.7: Rückansicht des Testreceivers auf der Forschungsebene

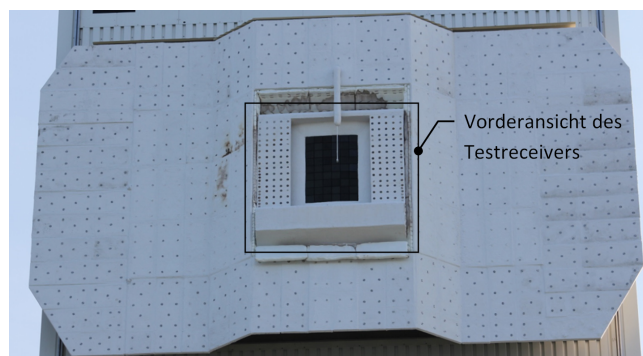


Abbildung 1.8: Vorderansicht des Testreceivers

2 Grundlagen

2.1 Strahlung

In diesem Abschnitt wird in die zum Verständnis der folgenden Kapitel notwendigen Grundlagen der Strahlungsphysik und der Solarstrahlung eingeführt.

2.1.1 Strahlungsphysikalische Größen

Um die Einstrahl- oder Reflexionsrichtung von Strahlung im Raum beschreiben zu können werden die sphärischen Koordinaten Elevationswinkel θ und Azimutwinkel φ verwendet. Wie in Abbildung 2.1 zu erkennen ist, beschreibt der Elevationswinkel hierbei die Neigung, die der Verbindungsvektor zum Punkt P zur Flächennormalen der Fläche A einnimmt. Aus diesem Grund wird der Winkel auch Neigungs- oder Erhebungswinkel genannt. Die Drehung des in die horizontale Ebene projizierten Vektors \vec{p} wird mit dem Azimutwinkel beschrieben. Die Lage $\varphi = 0$ kann hierbei je nach Anwendung frei definiert werden.

Eine weitere wichtige Größe ist der Raumwinkel Ω , welcher als dreidimensionales Gegenstück zum Winkel in der Ebene angesehen werden kann. Statt den Anteil eines Kreises in der Ebene beschreibt er den Anteil einer Kugel im Raum (siehe Abb. 2.2). Zur Vorstellung hilft der Lichtkegel eines Scheinwerfers, welcher einen bestimmten dreidimensionalen Öffnungswinkel aufweist. Dieser Anteil wird durch die Mantelflächen einer

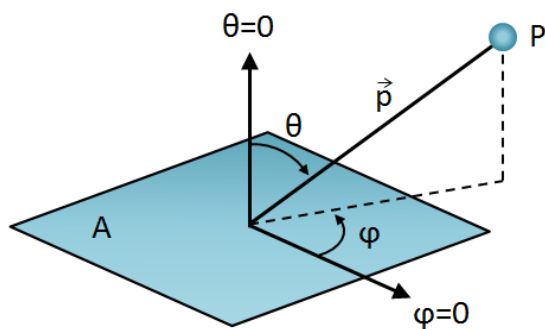


Abbildung 2.1: Definition der sphärischen Koordinaten

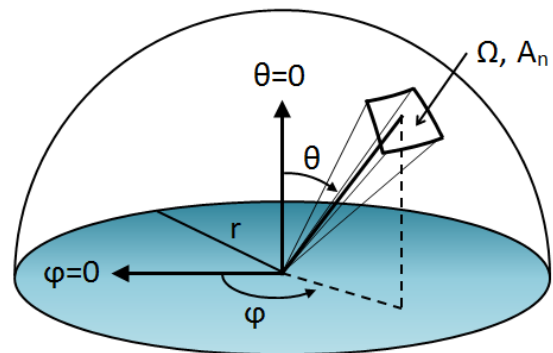


Abbildung 2.2: Definition des Raumwinkels

Pyramide bestimmt, deren Spitze im Koordinatenursprung liegt und deren Richtung durch die Winkel θ und φ gegeben ist. Auf diese Weise wird die Fläche A_n aus der Oberfläche der Kugel mit dem Radius r herausgeschnitten. Der Raumwinkel Ω ist nun ein Verhältnismaß, das die Teilfläche, für die der Raumwinkel zu bestimmen ist, in Beziehung zum Quadrat des Kugelradius setzt. Berechnen lässt sich dieser demnach mit:

$$\Omega = \frac{A_n}{r^2} \quad (2.1)$$

Dabei wird der Raumwinkel unabhängig von der Form der Fläche A_n beschrieben. Die Einheit des Raumwinkels wird Steradian (sr) genannt und kann durch die Zahl 1 ersetzt werden. [8]

Zu den für das allgemeine Verständnis dieser Arbeit notwendigen Strahlungsgrößen gehören die Bestrahlungsstärke, der Strahlungsfluss, die Strahlungsflussdichte, die Strahlstärke und die Strahldichte.

Wird die Oberfläche eines Körpers bestrahlt, wird die Bezeichnung Bestrahlungsstärke E [W/m²] verwendet:

$$E = \frac{d\Phi}{dA_2} \quad (2.2)$$

Der Strahlungsfluss Φ [W] ist die in einer Zeitspanne dt ausgegebene Strahlungsenergie dQ :

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

Um dem Beispiel des Scheinwerfers zu folgen kann mithilfe dieser Größe die gesamte ausgestrahlte Energie erfasst werden.

Wird der Strahlungsfluss auf eine zur Strahlrichtung senkrechten Fläche bezogen, so ergibt sich die Strahlungsflussdichte D [W/m²]:

$$D = \frac{d\Phi}{dA_{\perp}} \quad (2.4)$$

Wird beispielhaft der Fokus des Scheinwerfers verringert bleibt der Strahlungsfluss, also die gesamte ausgestrahlte Energie, konstant, die Strahlungsflussdichte nimmt hingegen aufgrund des sinkenden Strahlungsquerschnitts deutlich zu. Bei dieser strahlungsphysikalischen Größe handelt es sich um die spätere Messgröße im Messsystem.

Mit der Bezeichnung Strahlstärke I [W/sr] kann hinzukommend ermittelt werden, welcher Bruchteil des Strahlungsflusses in die einzelnen räumlichen Richtungen des Kegels ausgestrahlt wird. So wird mittig eine größer Strahlstärke zu messen sein als im Randbereich des Lichtkegels. Die Strahlstärke gibt demnach an, wie viel Strahlungsfluss pro Raumwinkelement ausgesandt wird.

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.5)$$

Die Strahldichte $[W/m^2 \cdot sr]$ stellt nun abschließend die Strahlstärke in Abhängigkeit zur Größe der Lichtquelle, sodass

$$L = \frac{I}{dA \cdot \cos(\theta)} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos(\theta)} \quad (2.6)$$

Ein Scheinwerfer mit kleiner Öffnung erscheint dem Betrachter heller als ein Scheinwerfer mit größerer Öffnung, obwohl beide dieselbe Strahlstärke aufweisen. Um dieser Tatsache gerecht zu werden setzt die Strahldichte diese Größen ins Verhältnis. Der Kosinus-Term im Nenner berücksichtigt, dass eine schräg betrachtete Fläche kleiner wirkt, als eine senkrecht betrachtete.

2.1.2 Reflexionseigenschaften realer Oberflächen

Das Reflexionsverhalten von beliebigen Oberflächen kann mit Hilfe der beiden idealisierten Grenzfälle, der spiegelnden und der diffusen Reflexion, beschrieben werden. Bei der spiegelnden Reflexion (siehe Abb. 2.3) wird die einfallende Strahlung aus der Richtung θ und φ unter einem gleich großen Elevationswinkel $\theta_r = \theta$ reflektiert. Der Azimutwinkel der reflektierten Strahlung ist hierbei $\varphi_r = \varphi + \pi$. Bei einer diffus reflektierenden Oberfläche (siehe Abb. 2.4) wird die einfallende Strahlung aus der Richtung θ und φ hingegen in alle Richtungen des gesamten Halbraums mit der gleichen Strahldichte zurückgeworfen. Eine gleichmäßig bestrahlte diffuse Oberfläche weist somit aus jeder Blickrichtung die gleiche Helligkeit auf.

Das tatsächliche Reflexionsverhalten realer Oberflächen stellt eine Kombination dieser beiden Grenzfälle dar. Während polierte, blanke Metallflächen nahezu spiegelnd reflektieren, zeigt sich an rauen und matten Oberflächen in guter Näherung eine diffuse Reflexion. Die Dimension der Rauheiten muss dabei in Relation zur Wellenlänge der Strahlung betrachtet werden. Während eine Oberfläche für kurzwellige Strahlung ein raues Verhalten und somit diffuse Reflexion aufweisen kann, verhält sie sich langwelliger Strahlung gegenüber als glatt, was zur spiegelnden Reflexion führt. [23]

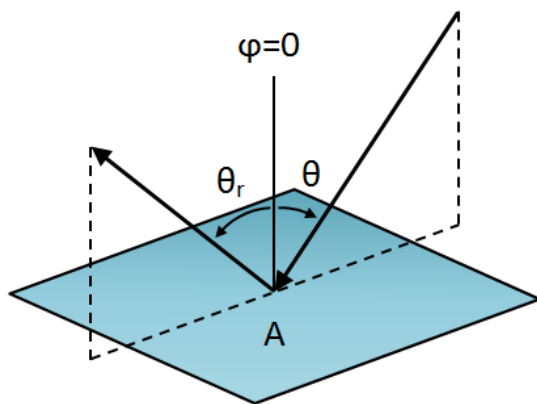


Abbildung 2.3: Spiegelnde Reflexion

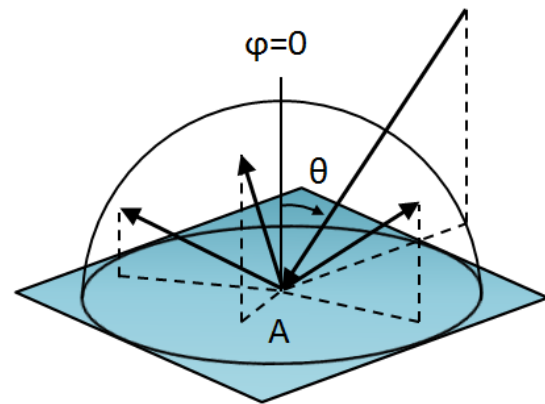


Abbildung 2.4: Diffuse Reflexion

2.1.3 Solarstrahlung

Quelle der Solarenergie ist die Sonne mit ihren im Innern stattfindenden Kernfusionsprozessen. Aufgrund der großen mittleren Entfernung von $149,6 \cdot 10^6$ km erreicht nur ein Bruchteil der erzeugten 60 MW/m^2 die Erde. Außerhalb der Erdatmosphäre beträgt die Strahlung auf der Nordhalbkugel noch 1325 W/m^2 im Sommer und 1420 W/m^2 im Winter. Sie wird als extraterrestrische Solarstrahlung bezeichnet. Der Mittelwert dieser Bestrahlungsstärke wird als Solarkonstante definiert und beträgt:

$$E_0 = 1367 \pm 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (2.7)$$

Die auf der Erdoberfläche gemessene Strahlung ist selbst bei klarem Himmel geringer als die Solarkonstante, bedingt durch Absorption und Streuung an Luftmolekülen und Aerosolen. Der Grad der Abschwächung wird einerseits durch den Sonnenstand und der daraus resultierenden Weglänge der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre und andererseits durch vorherrschende atmosphärische Bedingungen bestimmt. Zur Quantifizierung der Weglänge wird der Faktor Luftmasse (engl. air mass, AM) eingeführt. Er gibt an, wie oft der Weg des Sonnenlichts durch die Atmosphäre dem kürzesten Weg entspricht. Senkrechter Sonnenstand entspricht demnach AM1, während AM5 das fünf-fache dieser Strecke bedeuten würde. Die extraterrestrische Strahlung wird mit AM0 bezeichnet, da sie keinen Weg durch die Atmosphäre zurücklegt.

Zur Berechnung des AM-Wertes wird der Elevationswinkel θ_S der Sonne benötigt, welcher als Winkel zwischen der Sonne und dem Horizont definiert ist. Unter Berücksichtigung der gekrümmten Erdatmosphäre und der Lichtbrechung bei kleinen Einstrahl-

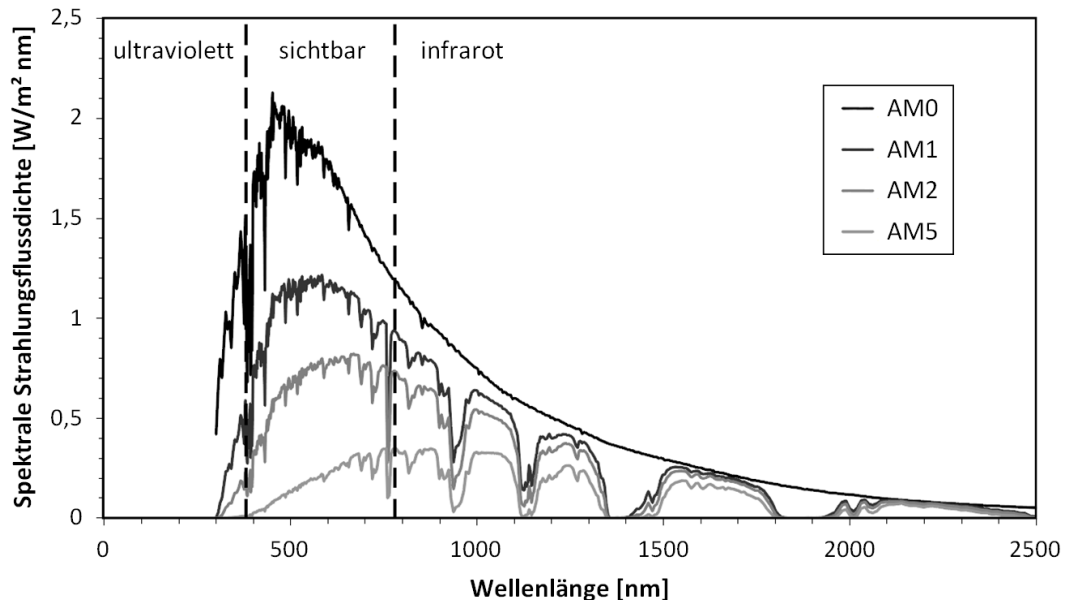


Abbildung 2.5: Spektrale Direktstrahlungsverteilung bei verschiedener Luftmasse [6]

winkeln, lässt sich der AM-Wert wie folgt berechnen [19]:

$$AM = \frac{1}{\sin(\theta_S) + 0,50572 \cdot (6,07995^\circ + \theta_S)^{-1,6364}} \quad (2.8)$$

Die zu den AM-Werten zugehörigen Elevationswinkel θ_S sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Abbildung 2.5 zeigt das Spektrum der extraterrestrischen Strahlung, sowie das Standardspektrum der Sonnenstrahlung auf Meereshöhe für verschiedene Sonnenstände zwischen AM1 und AM5. Deutlich zu sehen sind die durch die verschiedenen Gasteilchen der Atmosphäre verursachten Absorptionsbänder und die verstärkte Reduzierung des Spektrums im kurzwelligen Bereich. Das bedeutet, dass sich die Verteilung des Sonnenspektrums mit steigender Luftmasse ins Infrarote verschiebt. Durch Integration der mittleren spektralen Bestrahlungsstärke über den gesamten Wellenlängenbereich lassen sich Standardbestrahlungsstärken berechnen die in Tabelle 2.1 aufgelistet sind.

Luftmasse	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Elevationswinkel in °
AM1	826	90
AM2	590	30
AM3		19,3
AM5	266	11,3
AM7		7,8

Tabelle 2.1: Bestrahlungsstärke und Elevationswinkel ausgewählter Luftmassen

2.2 Entwicklungsumgebung LabVIEW

2.2.1 Aufbau

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, wie das Programmiersystem LabVIEW aufgebaut ist, da es im weiteren Verlauf der Arbeit eine entscheidende Funktion einnehmen wird. Hierbei wird auf die grundlegende Funktion, sowie die Vor- und Nachteile eingegangen.

LabVIEW ist eine rein graphische Entwicklungsumgebung aus dem Hause National Instruments und steht für **L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench. Die eingesetzte Programmiersprache heißt “G” und arbeitet nach dem Datenflussprinzip. Hierbei bestimmt die Verfügbarkeit von Daten die Ausführungsreihenfolge. Erhält ein Baustein des Programmcodes auf allen Eingangsleitungen ein Signal wird dieser ausgeführt und die Ergebnisse auf die Ausgangsleitung gelegt, um zum nächsten Baustein zu gelangen. Ein Programmablauf kann nun erstellt werden, indem unterschiedliche

Bausteine, auch VIs (virtuelle Instrumente) genannt, mittels Datenleitungen miteinander verbunden werden. Die Richtung, also die Abfolge der Abarbeitung, wird nun automatisch durch den Fluss, und der damit verbundenen Verfügbarkeit der Daten, bestimmt. Bei den weit verbreiteten sequentiellen Programmiersprachen wie C++ wird die Reihenfolge der Ausführung hingegen durch die Befehlsreihenfolge festgelegt. Ein weiterer wesentlicher Unterschied, den das Datenflussprinzip im Vergleich zur sequentiellen Programmierung mit sich bringt, sind parallele Abläufe. Stehen Funktionsblöcke nicht in Abhängigkeit zueinander, sondern treten in unterschiedlichen Verknüpfungslinien auf, werden sie gleichzeitig ausgeführt. [24]

LabVIEW ist in zwei Programmirebenen aufgebaut: dem sogenannten Frontpanel und dem Blockdiagramm. Während auf dem Frontpanel die Eingaben von Daten und eine Visualisierung der Ergebnisse erfolgt (siehe Abb. 2.6 linkes Fenster), wird im Blockdiagramm der graphische Programmcode hinterlegt (rechtes Fenster). Das Frontpanel stellt somit die Benutzerschnittstelle dar, auf welcher der Programmierer Komponenten platzieren kann, mithilfe derer der Anwender das Programm bedient. Hierzu gehören Elemente zur Dateneingabe, zum Starten von Prozessen, zur Verfolgung des Programmlaufs und zur Betrachtung der Ergebnisse. So können z.B. Zahlen- und Texteingabefelder, Ein- und Ausschalter, Drehregler oder Diagrammfenster darauf platziert werden. Das Frontpanel in Abbildung 2.6 zeigt beispielsweise die Summe und den Mittelwert zweier Zahlen an. Mittels Drehreglern kann der Benutzer die beiden Zahlen definieren und auf dem Rundinstrument wird ihm dann der Mittelwert und in der numerischen Anzeige die Summe angezeigt. Wie diese Berechnung nun genau abläuft wird im Blockdiagramm entschieden.

Wird auf dem Frontpanel ein Objekt platziert entsteht zeitgleich im Blockdiagramm ein entsprechendes Symbol. In Abbildung 2.6 sind diese Symbole zu erkennen. Die Ver-

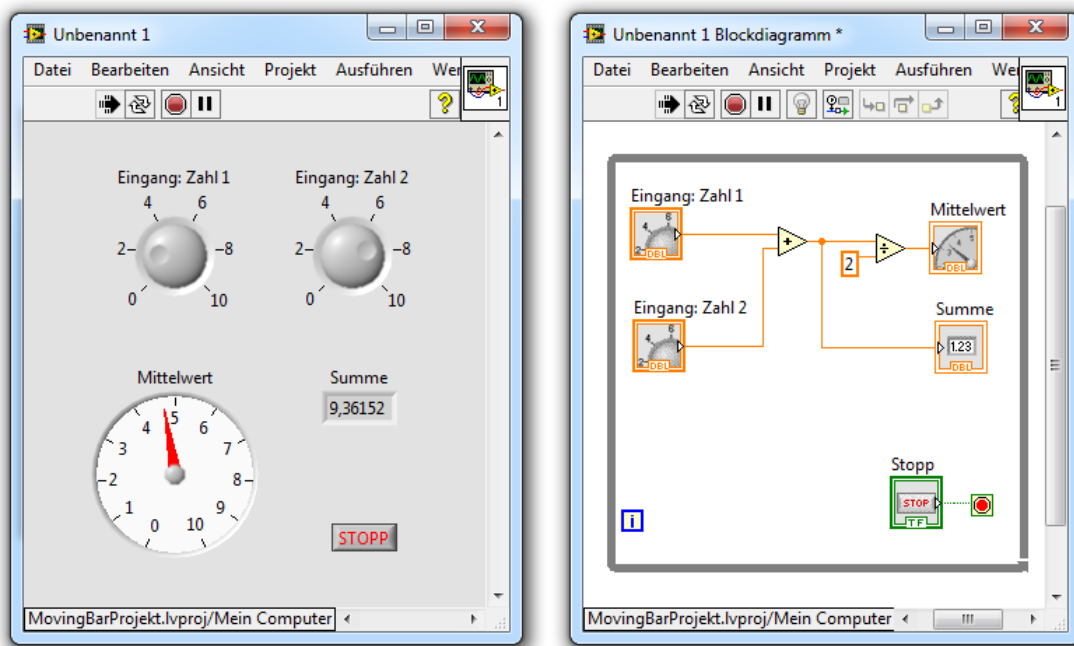


Abbildung 2.6: Beispielprogramm mit Frontpanel (links) und Blockdiagramm (rechts)

bindungen bestehen zunächst nicht, sodass der Programmierer aufgefordert ist mittels einer geeigneten Programmierung festzulegen, in welcher Form die Daten verwendet werden. Im aufgeführten Beispiel werden die beiden Zahlen zuerst addiert, indem beiden Zahlen mit dem Additionsblock verbunden werden. Das Ergebnis wird anschließend an die numerische Ausgabe “Summe“ und an den Divisionsblock weitergeleitet. Erst wenn das Ergebnis am Divisionsblock anliegt wird dieser ausgeführt und das Ergebnis an das Rundinstrument “Mittelwert“ weitergegeben. [25]

2.2.2 Vor- und Nachteile

Durch das Vereinen des Datenflussprinzips mit der graphischen Programmierung aus Blockdiagramm und Frontpanel ist es den Entwicklern gelungen ein System zu schaffen, welches sich in Forschung und Entwicklung etabliert hat. Ingenieure und Wissenschaftler können auf diese Weise in kürzester Zeit eine Vielzahl von Anwendungen erstellen, um Datenerfassung, Datenanalyse und Datenpräsentation zu betreiben. Die Programmierung eines Messsystems hingegen geht über die übliche Anwendung von LabVIEW hinaus, weshalb eine Auflistung von Vor- und Nachteilen folgt. Aufgeführt sind hier sowohl Argumente, die LabVIEW als reine Entwicklungsumgebung betreffen als auch solche, die sich speziell auf die Programmierung eines Messsystems beziehen.

Vorteile

- **Intuitive Benutzeroberfläche:** Das Frontpanel in LabVIEW bietet eine einfache und dennoch sehr umfangreiche Möglichkeit eine intuitive Benutzeroberfläche zu erschaffen, die dem Anwender die Nutzung des Messsystems vereinfacht.
- **Weitreichende Hardwareunterstützung:** Die vielen zusätzlichen Funktionsbibliotheken in LabVIEW decken die Ansteuerung von externen Geräten weitgehend ab. Zudem bieten viele Hersteller LabVIEW-Treiber für ihre Geräte an, sodass diese leicht eingebunden und bedient werden können.
- **Leicht erlernbar:** Die graphische Programmierung ermöglicht es vielen unerfahrenen Programmieren die Programmlogik zu verstehen und in kleinem Umfang anzuwenden.
- **Lizenz vorhanden:** Die LabVIEW-Lizenz ist im DLR-Standort Jülich bereits vorhanden, sodass Kosten eingespart werden, indem bereits Verfügbares genutzt wird.

Nachteile

- **Unübersichtliche Programmierung:** Bei umfangreichen Programmen ist die Gefahr hoch, dass die Übersichtlichkeit verloren geht.

- **Unflexibel:** Kleine Änderungen, die an einer Stelle Platz benötigen wo keiner vorhanden ist, können aufwendige Umstrukturierung nach sich ziehen, um die Übersichtlichkeit wiederherzustellen.
- **Datenfluss:** Das Datenflussprinzip wird meist als großer Vorteil von LabVIEW angesehen. Wird hingegen ein Messsystem programmiert, dass eine bestimmte sequentielle Abfolge abarbeiten soll, erweist sich dies schnell als Hindernis. LabVIEW bietet zwar die Möglichkeit sequentielle Strukturen zu nutzen, allerdings nur auf Kosten der Unterbrechung des Datenflussprinzips. Soll allerdings eine sequentielle Abfolge durchgeführt werden bei gleichzeitig fortlaufendem Datenfluss, muss eine aufwendige Fallunterscheidung programmiert werden.

2.3 Solarturm Jülich

Beim Solarturm Jülich handelt es sich um ein solarthermisches Kraftwerk des DLR. Die Anlage wurde im Rahmen des Projektes “Solarthermisches Versuchs- und Demonstrationskraftwerk Jülich“ von einer Kooperation aus Forschung und Industrie projektiert und errichtet. Das DLR und das Solar-Institut Jülich übernahmen hierbei den wissenschaftlichen Teil, während die Kraftanlagen München GmbH als Generalunternehmen für den Bau zuständig war. Das Kraftwerk war mit Abschluss der Bauarbeiten im Jahr 2010 weltweit einzigartig, da es Luft als primäres Arbeitsmedium nutzt [26]. Nachdem die Machbarkeit dieser Gesamtanlage bestätigt wurde, befindet sich nun auch eine Anlage gleichen Funktionsprinzips in Algerien im Bau.

Das Kraftwerksareal erstreckt sich über eine Fläche von ca. 10 Hektar und umfasst hierbei den Kraftwerksturm und das Heliostatfeld.

2.3.1 Aufbau des Solarturms

Der Aufbau des Solarturms zeichnet sich dadurch aus, dass nahezu alle Kraftwerkskomponenten im Turm selbst untergebracht sind. Lediglich das Kühlsystem befindet sich außerhalb des Turms, um die abgesonderte Wärme an die Umgebung weiterzugeben (siehe Abb. 2.7). Alle übrigen Komponenten sind in den einzelnen Etagen des Turms verbaut.

Die wesentliche Komponente ist hierbei der Luftreceiver an der Spitze des Turms. Er besteht aus 1080 Receivercups und weist dabei eine Größe von 22 m^2 auf. Wird dieser durch das Heliostatfeld bestrahlt, erhitzt er sich auf bis zu 1000 °C . Durch die poröse Parallelkanalstruktur der einzelnen Cups wird nun Umgebungsluft angesaugt, die sich beim Durchgang auf bis zu 700 °C erhitzt. Diese erhitzte Luft wird daraufhin durch die rot eingefärbten Heißluftkanäle eine Ebene nach unten in den Dampfkessel geführt. Hier wird die Wärme genutzt, um überhitzten Wasserdampf zu produzieren, welcher bei Nennlast eine Temperatur von 485 °C und einen Druck von 28 bar erreicht. Der überhitzte Wasserdampf wird nun in die erste Etage geleitet, um dort eine Dampfturbine anzutreiben. Die erzeugte mechanische Energie wird letztlich verwendet, um einen Generator anzutreiben und die somit erzeugte elektrische Energie in das örtliche



Abbildung 2.7: Aufbau des Solarturms [7]

Stromnetz einzuspeisen.

Hat die Anlage nach dem Anfahren ihre Nennlast erreicht besteht zudem die Möglichkeit ein Teil der vom Receiver kommenden Heißluft abzuzweigen und in den Wärmespeicher zu führen, welcher unterhalb des Dampfkessels positioniert ist. Ziel dieser Maßnahme ist eine Entkopplung der Stromerzeugung von dem fluktuierenden solaren Strahlungsangebot. Bei Wolkendurchzug kann die Wärme vorübergehend aus dem Speicher entnommen werden, sodass keine Verringerung oder Unterbrechung der Stromproduktion auftritt. Ein vollends gefüllter Wärmespeicher reicht aus um eine Verschattung des Heliostatfeldes bis zu einer Stunde zu kompensieren.

Die Gebläse um den Luftkreislauf zu betreiben befinden sich eine Ebene unterhalb des Wärmespeichers. Hauptaufgabe ist die Versorgung des Dampfkessels mit Heißluft. Hat diese den Großteil ihrer Wärme abgegeben, weist sie immer noch Temperaturen zwischen 120 °C und 200 °C auf. Um diese Restwärme sinnvoll zu nutzen wird die Luft im Anschluss vom Gebläse wieder durch die blau markierten Kaltluftkanäle in Richtung Receiver transportiert. Dort wird die Restwärme zwischen den einzelnen Receivercups ausgeblasen, sodass diese bereits vorgewärmte Luft ansaugen. [20]

2.3.2 Aufbau des Heliostatfeldes

Das Heliostatfeld besteht aus 2153 Heliostaten, welche zweiachsig der Sonne nachgeführt werden. Auf diesem Wege wird die einfallende Direktstrahlung vielfach auf den Receiver gelenkt, sodass bis zu 1000-fach konzentrierte Soloarstrahlung hoher Energiedichte zur Wärmeumwandlung bereitgestellt wird. Jeder einzelne Spiegel weist hierbei eine Fläche von $8,24\text{ m}^2$ auf, woraus sich eine Spiegelfläche von 17741 m^2 ergibt.

Abbildung 2.8 zeigt die Anordnung der Heliostate. Sie sind in Reihen angeordnet, deren Abstände mit der Entfernung zum Turm zunimmt. Die flacher werdenden Einstrahlwinkel erfordern diese Maßnahme, um eine Abschattung durch den in voriger Position befindlichen Heliostat zu vermeiden. Die Unterbrechung dieser Regelmäßigkeit durch eine von Heliostaten freigehaltene Nord-Süd-Gasse, ist mit einer Erdgasleitung zu begründen, welche an dieser Stelle unter dem Gelände des Solarturms verläuft. Aufgrund der nördlichen Installation des Spiegelfeldes wird dieses auch als Nordfeld bezeichnet.

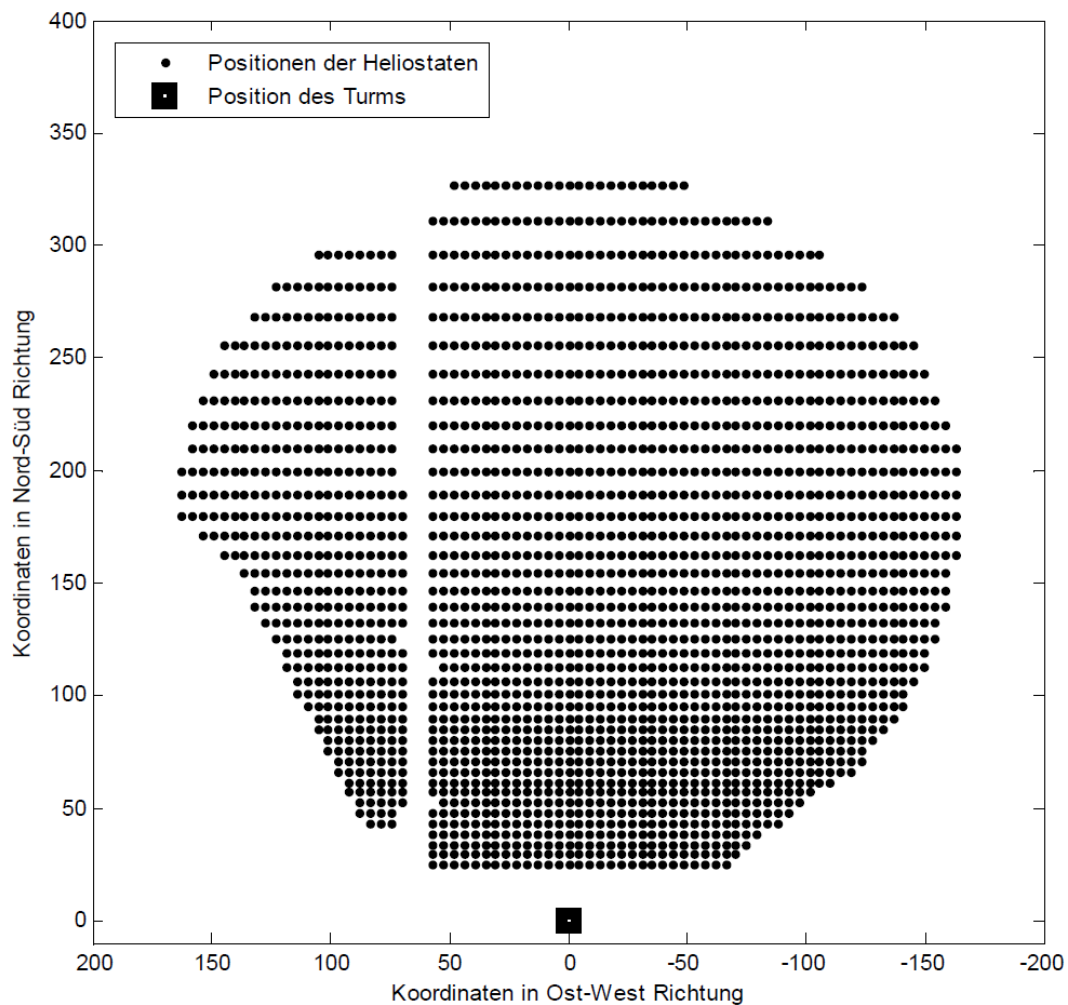


Abbildung 2.8: Aufbau des Heliostatfeldes [8]

3 Ausgangssituation

Das zu entwickelnde Messsystem hatte zu Beginn der Masterarbeit bereits einige Entwicklungsphasen durchlaufen. Beschrieben wird in diesem Kapitel aus diesem Grund der Ist-Zustand des Systems zum Startzeitpunkt des Masterprojekts, um eine klare Grenze aufzuzeigen zwischen dem Entwicklungsanteil des DLR und dem eigens Geleisteten.

3.1 Messverfahren

Als Messverfahren für die Detektion der Strahlungsflussdichte wurde die indirekte “Kamera-Target-Methode” ausgewählt. Sie besteht im Wesentlichen aus einer weißen diffus reflektierenden Platte (Target), die vor dem Receiver oder der Apertur eines sonstigen Experiments, das Informationen über die Menge und Intensität der einfallenden Strahlung benötigt, durch die konzentrierte Solarstrahlung gefahren wird und einer Schwarzweiß-Kamera, welche das Target bei dieser Fahrt vielfach aufnimmt (siehe Abb. 3.1). Mit Hilfe eines Radiometers, einem Messgerät, das in der Lage ist die Flussdichte punktuell direkt zu messen, kann nun ein Kalibrationsfaktor bestimmt werden,

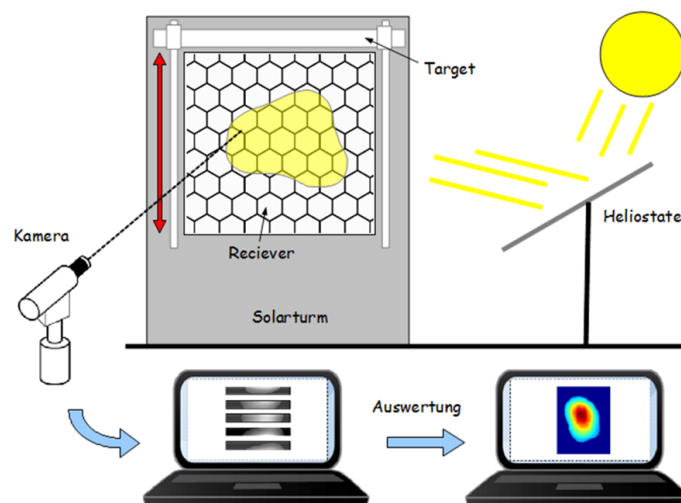


Abbildung 3.1: Funktionsprinzip der Kamera-Target-Methode [5]

der den Zusammenhang zwischen Grauwerten der Kameraaufnahmen und der Flussdichte enthält. Anschließend muss aus den aufgenommenen Bildern jeweils das Target ausgeschnitten und zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden. Zuletzt wird der ermittelte Kalibrationsfaktor auf alle Grauwerte angewandt und es ergibt sich die Flussdichteverteilung über den gesamten Receiver.

Dieses Verfahren ist weit verbreitet aufgrund der hohen örtlichen Auflösung, der kurzen Messzeit und der Möglichkeit zur Kalibration der gesamten Verteilung mit nur einem Radiometer.

3.2 Anforderungen

Folgende Anforderungen an das Messsystem wurden durch die Betreiber der Forschungsebene formuliert:

- **Vertikal bewegliches Target:** Der Träger (Movingbar), auf dem sich das Target befindet, soll vertikal verfahren können.
- **Geometrische Rahmenbedingungen:** Die Receiverfläche mit einer Höhe von 1,3 m und einer Breite von 0,865 m muss abgedeckt sein. Zudem ist der geringe Bauraum zwischen Testreceiver und umgebenden Strahlungsschutz zu berücksichtigen.
- **Strahlungsarme Parkposition:** Wird das Messsystem nicht verwendet soll es einer möglichst geringen Strahlung ausgesetzt sein.
- **Temperaturüberwachung:** Durch den Einsatz von Temperatursensoren in der Movingbar soll eine Temperaturüberwachung an relevanten Messstellen erfolgen.
- **Thermische Belastbarkeit:** Die verwendeten Komponenten müssen den auftretenden Temperaturen auf längere Sicht standhalten können. Gegebenenfalls muss mit einer geeigneten Kühlung gewährleistet werden, dass Grenztemperaturen nicht überschritten werden.
- **Benutzerfreundlichkeit:** Das Messsystem soll durch ein hohes Maß an Automatisierung und durch eine übersichtliche Darstellung eine einfache Bedienung gewährleisten.
- **Systemkalibration:** Mittels eines eingebauten Radiometers soll eine Kalibrierung ermöglicht werden.
- **Hohe Genauigkeit:** Unter Berücksichtigung von Fehlereinflüssen und deren bestmöglicher Korrektur soll eine hohe Genauigkeit des Messsystem erreicht werden.
- **Entwicklungsumgebung:** Das Messsystem soll mittels LabVIEW programmiert und bedient werden.

3.3 Entwicklung der Movingbar

3.3.1 Konstruktion

Wesentlicher Bestandteil des Messsystems ist die Movingbar, an dem das Target angebracht ist. Da dies aufgrund der geforderten Breite, dem erforderlichen Verfahrensweg und der Integration von Kühlsystemen und Sensoren eine beträchtliche Größe aufweist, soll zuerst auf die mechanische Konstruktion eingegangen werden.

Der mechanische Teil der gesamten Movingbar-Konstruktion besteht aus zwei Säulen (grün eingefärbt in Abb. 3.2), vier Anbindungen an den Testreceiver (blau) und der Movingbar selbst (grau). Die Säulen dienen in erster Linie zur Befestigung der Antriebe. Zusätzlich sind jedoch Schienen angebracht, die über Rollenwagen das Drehmoment aufnehmen, welches durch die 40 kg schwere Movingbar erzeugt wird. Dies führt zu einer deutlich längeren Lebensdauer der Antriebe, aufgrund der geringeren Belastung. Mittig an jeder der 2,50 m langen Säulen sind Flansche angebracht, um die komplette Konstruktion mit der Testreceiver-Anlage zu verbinden. An diesen Verbindungen hängt der gesamte Aufbau, sodass kein Kontakt zum Boden besteht. Notwendig ist diese Art der Befestigung, da der gesamte Testreceiver nach oben oder unten geneigt werden kann, um die Cups auch mit extremen Einstrahlungswinkeln testen zu können. Die Movingbar würde in diesem Fall die gleiche Neigung erfahren und somit dennoch eine Flusssichtmessung ermöglichen. Das letzte Element ist die Movingbar selbst. Sie weist

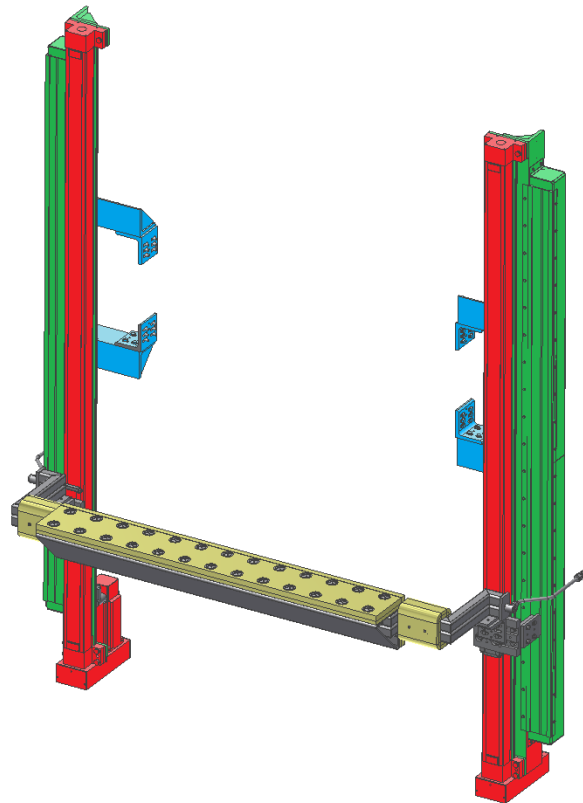


Abbildung 3.2: Konstruktion der Movingbar

an den Enden eine eckige Konstruktion auf, was auf den geringen Bauraum zwischen Movingbar und Strahlungsschutz zurückzuführen ist, der durchquert werden muss. An jeder Seite sind zudem zwei Befestigungspunkte zu erkennen. Einer dient als Anbindung an den Antrieb, um die Movingbar vertikal bewegen zu können und der Andere wird an die bereits beschriebenen Rollenwagen befestigt, um das Drehmoment der Movingbar aufzunehmen. In der Mitte ist unter einem Neigungswinkel von 45° das Target angebracht. Die geneigte Ausführung des Targets liegt an der Kameraposition, die ursprünglich unterhalb der Movingbar vorgesehen war. Jedoch wurde diese im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses ins Heliostatfeld verlegt ohne jedoch den Neigungswinkel wieder zu entfernen. Die geneigte Fläche bietet Platz für eine 20 cm hohe und 130 cm breite Targetfläche.

3.3.2 Antrieb

Bei den Antrieben zur vertikalen Bewegung der Movingbar handelt es sich um Linearantriebe (siehe Abb. 3.3). Sie bieten den Vorteil einer hohen Positionier- und Haltegenauigkeit, was für robuste und fehlerfreie Messungen von großer Bedeutung ist. Zudem können sie hohe Tragkräfte bewältigen und sind wartungsfrei über lange Zeiträume. Die beiden Linearantriebe bestehen aus einem leistungsstarken Elektromotor, einem Kugelgewindetrieb, einer Kugelschienenführung und der Sensorik. Einer der beiden Linearantriebe fungiert als Master, während der Andere als sogenannter Slave agiert. Dies hat zur Folge, dass der eine Motor immer die Bewegung und Befehle des Anderen nachahmt und somit beide synchron hinsichtlich Geschwindigkeit und Position arbeiten. Die Linearantriebe sind vertikal an den beiden Säulen der Stahlkonstruktion angebracht (rot eingefärbt in Abb. 3.2). Angesteuert werden die beiden Motoren von zwei Regelgeräten, die von einer weiteren Steuerung die Fahrbefehle erhalten. Alle steuerungsrelevanten Bauteile sind in einem Schaltschrank zusammengefasst. Der eingesetzte Linearantrieb kann beliebig langsame Verfahrgeschwindigkeiten bis hin zu einer Maximalgeschwindigkeit von 0,9 m/s realisieren. Der Fahrweg beträgt dabei 170 cm. [27]

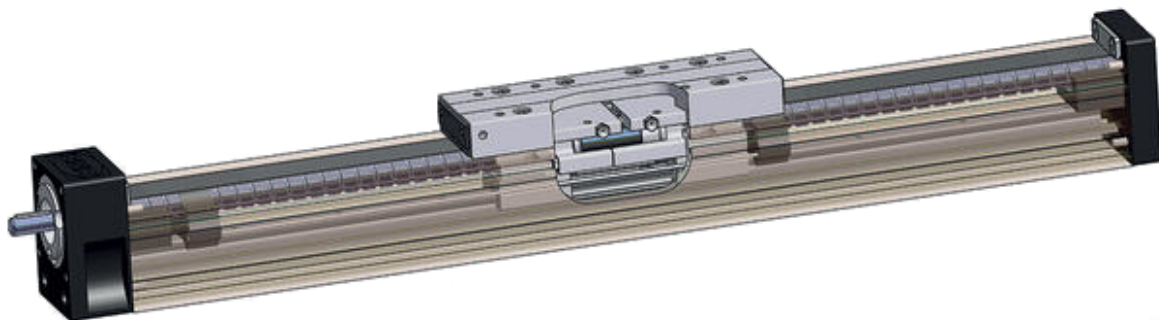


Abbildung 3.3: Aufbau eines Linearantriebs mit Kugelgewindetrieb[9]

3.3.3 Kühlkonzepte

Da die Movingbar im Zuge ihrer Messung konzentrierter Solarstrahlung ausgesetzt wird, gilt es eine geeignete Kühlung zu installieren, um ein Überschreiten von Grenztemperaturen und eine damit einhergehende Beschädigung der Messeinrichtung zu verhindern. Gekühlt werden muss hierbei die Movingbar und das Radiometer, welches eine Wasserkühlung benötigt (genauere Erklärung folgt in Kap. 3.4.1). Um beide Kühlsysteme ausreichende leistungsfähig zu gestalten ist zuvor eine Berechnung durchgeführt worden, um die Temperaturbelastung abzuschätzen.

Wird die Formel 2.3 für den Strahlungsfluss in die Formel 2.2 für die Bestrahlungsstärke eingesetzt, so ergibt sich für die gesamte im Strahl enthaltene Energie dQ :

$$dQ = dt \cdot E \cdot dA_2 \quad (3.1)$$

Unter Berücksichtigung der Reflektivität ρ der bestrahlten Fläche ergibt sich für die von der Oberfläche absorbierte Strahlungsenergie dQ_2 :

$$dQ_2 = dt \cdot E \cdot \rho \cdot dA_2 \quad (3.2)$$

Um die aufgenommene Energie nun in eine Temperaturerhöhung umzurechnen wird die Formel für die Wärmekapazität nach ΔT umgestellt:

$$\Delta T = \frac{dQ_2}{c_p \cdot m} \quad (3.3)$$

Bei der abschätzenden Berechnung sind folgende Werte verwendet worden: $dt = 5 \text{ s}$; $E = 500 \text{ kW/m}^2$; $\rho = 0,9$; $A_2 = 0,26 \text{ m}^2$; $c_p = 500 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$; $m = 30 \text{ kg}$. Die spezifische Wärmekapazität c_p entstammt dem Datenblatt des verwendeten Stahls 1.4301 [28] und die hohe Masse von 30 kg ist das ermittelte Gewicht der gesamten Movingbar. Hintergrund ist die Annahme, dass sich die aufgenommene Wärme im Zuge einer Messfahrt anschließend gleichmäßig in der gesamten Movingbar verteilt. Ergebnis dieser Abschätzung ist eine Temperaturerhöhung um 4°C im Laufe einer einzelnen Flussdichtemessung.

Kühlung der Movingbar

Die Movingbar soll auf Grundlage dieser Berechnung durch einen Luftstrom kühl gehalten werden. An beiden Seiten der Movingbar ist hierfür ein Luftanschluss vorgesehen (siehe Abb. 3.4). Durch die blau eingefärbten Kühlkanäle wird die Luft durch das Bauteil geleitet, tritt daraufhin mittig aus den Kühlkanälen aus und fließt anschließend durch den Innenraum der Movingbar nach außen hin durch die offenen Enden ab. Die Luft zur Kühlung wird dem turminternen Luftdrucksystem entnommen, welches einen Druck von 5 bar bereitstellt. Die Verbindung über flexible Spiralschläuche ermöglicht eine dauerhafte Kühlung, auch während Kalibrations- und Messfahrten.

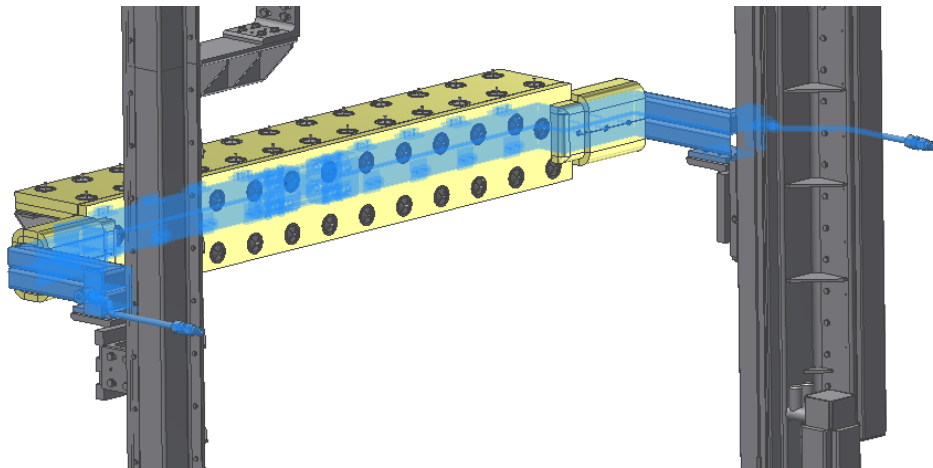


Abbildung 3.4: Luftkühlung der Movingbar mit Anschlüssen und Kühlkanälen

Kühlung des Radiometers

Zur Kühlung des Radiometers soll ein geschlossener Wasserkreislauf installiert werden, welcher von einer Pumpe betrieben wird und sich komplett im Innern der Movingbar befindet. Das Wasser soll hierbei mit seinem hohen c_p -Wert von $4,182 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ die geringe Temperaturerhöhung aufnehmen und diese nach jeder Messung wieder an den luftgekühlten Innenraum der Movingbar abgeben.

3.4 Auswahl der Systemkomponenten

3.4.1 Radiometer

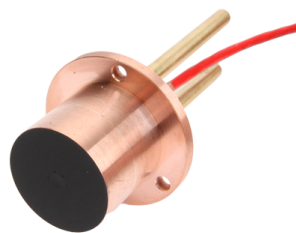


Abbildung 3.5: Wassergekühltes Radiometer: Sequoia Vatell TG1000-0 [10]

Wie bereits beschrieben wird zur Kalibration der Flussdichtemessung ein Radiometer benötigt. Hierfür wurde das Sequoia Vatell TG1000-0 ausgewählt (siehe Abb. 3.5). Es besitzt eine Wasserkühlung und zeichnet sich durch eine kurze Antwortzeit von $0,3 \text{ s}$, eine Wiederholgenauigkeit von 1% und durch einen Messbereich bis 1000 kW/m^2 aus. Das erzeugte Signal liefert hierbei eine Spannung von $0 - 10 \text{ mV}$. Das Radiometer wurde vor dem Einsatz im Sonnenofen des DLR, einer Anlage die konzentrierte Solarstrahlung bereitstellt, kalibriert. [10]

Das ausgewählte Radiometer ist ein sogenanntes Gardon-Radiometer. Es besteht aus

einem gekühlten Kupferrohr, einer drauf aufgeschweißten Folie aus Konstantan und einem im Zentrum der Folie angeschweißten Kupferdraht (siehe Abb. 3.6). Dieser Aufbau stellt ein zweifaches, entgegengesetztes Thermoelement dar (genaue Erklärung zum Thermoeffekt: siehe Kap. 5.1.1). Die Verbindung zwischen Kupferrohr und Konstantanfolie bildet das eine und der Schweißpunkt zwischen Folie und Draht das andere Thermoelement. Liegt nun an beiden Stellen die gleiche Temperatur an, sind beide Thermospannungen gleich groß aber entgegengesetzt, sodass keine Spannung zwischen Draht und Grundkörper zu verzeichnen ist. Wird die Folie hingegen bestrahlt, absorbiert sie einen Teil dieser Strahlung und erwärmt sich. Der gekühlte Grundkörper sorgt nun dafür, dass die Wärme nach außen hin abgeleitet wird, sodass ein Temperaturgefälle zwischen Mitte und Randbereich der Folie entsteht. Aufgrund der minimalen Foliendicke und des geringen Radius stellt sich bereits nach 0,3s ein Gleichgewicht dieses Gefälles ein, sodass zwischen den beiden Thermoelementen eine konstante Temperaturdifferenz entsteht. Diese Temperaturdifferenz steht in direkter Abhängigkeit zur Strahlungsflussdichte und kann nun zwischen Draht und Grundkörper gemessen werden. [6]

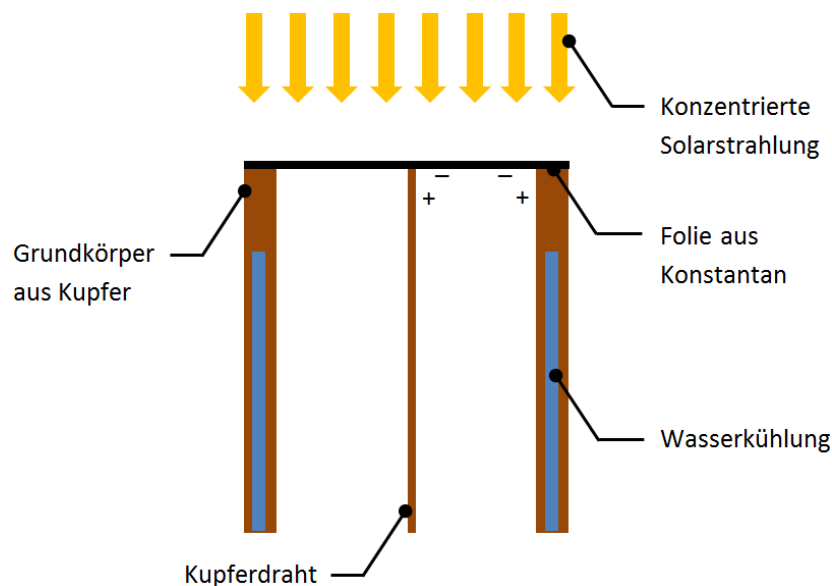


Abbildung 3.6: Prinzipskizze eines Gardon-Radiometers

3.4.2 Targetbeschichtung

Bei der Targetbeschichtung wurde eine oxidkeramische, plasma-gespritzte Schicht ausgewählt. Sie wurde von der Firma LWK-PlasmaCeramic GmbH auf ein Stahlblech mit den Abmessungen 1300 x 200 x 2 mm aufgetragen. Sie ist hitzebeständig und weist eine Oberfläche auf, die durch ihr Rauheit und durch ihre weiße Lackierung einer diffus reflektierenden Oberfläche nahe kommt.

3.4.3 Kamerasystem

Die Kamera fungiert im Gesamtsystem als Messgrößenaufnehmer oder Sensor und ist damit der Teil des Messsystems, welcher die Messgröße Flussdichte quantifizieren soll. Ausgewählt wurde die Ethernetkamera Prosilica GT2000 von Allied Vision Technologies (siehe Abb. 3.7) mit einem Festbrennweiten-Objektiv von Edmund Optics. Um die Brennweite zu verdoppeln kommt zusätzlich ein Zwischenring zum Einsatz. Das Kamerasystem zeichnet sich im Wesentlichen durch folgende Eigenschaften aus:

Komponente	Eigenschaft	Wert
Kamera	Auflösung	2048 x 1088
	Sensortyp	CMOS
	Sensorausführung	Monochrom
	Farbtiefe	12 Bit / 4096 GS
	Framerate	53 fps
Objektiv	Brennweite	100 mm
	Blendenbereich	F 2,8-22
	Blendenregelung	manuell mit Feststellschraube
	Fokussteuerung	manuell mit Feststellschraube

Tabelle 3.1: Eigenschaften des Kamerasystems [11]

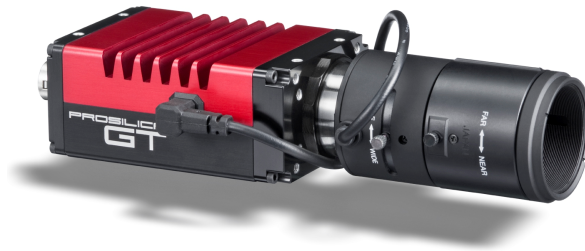


Abbildung 3.7: Ethernet-Kamera: AVT Prosilica GT2000 [11]

4 Aufgabenstellung

4.1 Ziel der Arbeit

Nachdem die Grundlagen mit den Erklärungen zur solaren Strahlung, zum verwendeten Programmiersystem und zum Testreceiver gelegt sind, soll nun die Aufgabenstellung, gerade vor dem Hintergrund eines bereits in der Entwicklung befindlichen Messsystems, präzisiert werden. Hierbei soll zuerst auf das Ziel der Arbeit eingegangen werden, welches im Allgemeinen bereits durch die Titelformulierung gegeben ist. Entwickelt werden soll ein Messsystem, welches in der Lage ist die Einstrahlungsleistung, sowie die Strahlungsverteilung, die auf den Testreceiver trifft, zu ermitteln. Die Zielsetzung ist demnach die Übergabe eines funktionierenden Messsystems, welches diese Informationen liefert. Während bereits einige der gestellten Anforderungen, wie die Beachtung der geometrischen Rahmenbedingungen und die strahlungsarme Parkposition, durch die im Vorlauf getätigten Entwicklungen erfüllt sind, gilt es die übrigen Forderungen bestmöglich zu verwirklichen. Hierzu gehört die Entwicklung weiterer notwendiger Systemkomponenten, sowie die Automatisierung und Bedienung des Systems mit der Entwicklungsumgebung LabVIEW.

Das Ziel der Arbeit kann somit durch folgende Punkte beschrieben werden:

- Entwicklung weiterer Systemkomponenten
 - Temperaturüberwachung durch Einbau von Sensoren inklusive entsprechender Signalwandlung
 - Einbau des Radiometers inklusive spezieller Signalwandlung
 - Gewährleistung der thermischen Belastbarkeit durch Einsatz von geeigneten Kühlkonzepten für die Movingbar und das Radiometer
 - Optimierungen in der Konstruktion, sofern diese notwendig sind
- Programmierung des Messsystems
 - Ansteuerung der Motoren und Auslesen der Motormesswerte aus der SPS
 - Auslesen der Temperatur- und Radiometerwerte
 - Automatisierte Abläufe der Kalibration und Messung
 - Übersichtliche Benutzeroberfläche für eine intuitive Bedienung

- Korrekturrechnungen bekannter Fehlereinflüsse
- Inbetriebnahme des Messsystems
- Bewertung der Genauigkeit des Messsystems auf Grundlage wissenschaftlicher Untersuchungen

4.2 Vorgehensweise

Aufgrund eines engen Zeitplans ist es nicht möglich das Messsystem grundlegend zu entwickeln und anschließend zu erproben bevor es für erste Messungen freigegeben wird, sodass entgegen dieser üblichen Vorgehensweise gehandelt werden muss. Die Erreichung der genannten Ziele muss deshalb in den folgenden zwei Entwicklungsphasen erfolgen. In der Ersten wird die thermische Beständigkeit gewährleistet und die Bewegung der Movingbar grundlegend zur Verfügung gestellt. Auf dieser Basis können nun in der zweiten Entwicklungsphase bereits Messungen durchgeführt werden, sodass Betrieb und Weiterentwicklung parallel vorangetrieben werden. Zwar sind Messungen zu diesem Zeitpunkt nur mit einem großen Aufwand möglich, die wenigen sonnenreichen Tage im Jahr zwingen den Betreiber des Testreceivers jedoch zu dieser Maßnahme. Schritt für Schritt werden in dieser Phase, parallel zum Betrieb, die weiteren Entwicklungsziele verfolgt und der Automatisierungsgrad sowie die Bedienbarkeit des Systems verbessert. Entgegen der chronologischen Abfolge wird im Folgenden nach der Entwicklung weiterer Systemkomponenten und der Programmierung des Messsystems gegliedert.

5 Entwicklung weiterer Systemkomponenten

5.1 Temperaturüberwachung

Wichtiger Bestandteil zur Überwachung des Messsystems ist eine funktionierende Temperaturüberwachung an kritischen Punkten. Da das System konzentrierter Bestrahlung bis 1000 kW/m^2 ausgesetzt werden soll, muss ein Überschreiten von Grenztemperaturen unverzüglich erkannt werden, um eine Beschädigung einzelner Komponenten zu verhindern. Die Sensoren selbst müssen hierbei den hohen Temperaturen standhalten und zuverlässige Werte liefern.

5.1.1 Temperatursensoren

Als Temperatursensoren kommen Thermoelemente zum Einsatz. Die Funktionsweise von Thermoelementen basiert auf dem Seebeck-Effekt. Liegt entlang eines Drahtes eine Temperaturdifferenz an, so stellt sich eine Ladungsverschiebung entlang desselben ein. Die Größe der Ladungsverschiebung unterscheidet sich je nach verwendetem Werkstoff. Werden nun zwei Drähte aus unterschiedlichen Werkstoffen an dem erwärmten Ende miteinander verbunden, so entsteht aufgrund der unterschiedlich großen Ladungsverschiebung eine Spannung an den offenen Enden. Da die gemessene Spannung lediglich durch die Temperaturdifferenz entsteht, muss die Temperatur am offenen Ende bekannt sein oder zusätzlich gemessen werden, um einen absoluten Temperaturwert angeben zu können. In gängigen Analog-Digital-Wandlern ist diese Temperaturvergleichsmessung bereits integriert. [16]



Abbildung 5.1: Mantelthermoelement Typ K mit Übergangshülse und Stecker [12]

Ausgewählt werden Mantelthermoelemente vom Typ K (siehe Abb. 5.1). Sie werden im Solarturm Jülich bereits vielerorts eingesetzt, da sie durch kurze Antwortzeiten und eine robuste Ausführung eine anspruchsvolle Präzisionstemperaturmessung ermöglichen. Sie zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

Eigenschaft	Wert
Materialien	Nickel-Chrom / Nickel
Farbcode	grün
Messbereich	-40 °C - 1000 °C
Genauigkeit	$\pm 0,4 \%$
Empfindlichkeit	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Temperaturbeständigkeit Kabelhülse	200 °C

Tabelle 5.1: Eigenschaften des Mantelthermoelements Typ K [16][17]

Die eingesetzten Thermoelemente wurden vor dem Einbau kalibriert. Die 2-Punkt-Kalibrierung wurde mit Hilfe eines Temperaturkalibrators (Ametek ATC-650B) durchgeführt. Er ist in der Lage eine eingestellte Temperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,11 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erreichen und diese mit einer Stabilität von $\pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ dauerhaft zu halten. [29]

5.1.2 Messstellen

Das Target ist im Laufe der Messungen besonders hoher Strahlungsbelastung ausgesetzt, weil es über mehrere Sekunden konzentrierte Solarstrahlung erfährt. Infolge dessen kommt es zu auf der Oberfläche zu einem Temperaturanstieg. Um Verformungen des Targets vorzubeugen wird jedoch ein Grenzwert von 200 °C definiert, der abhängig vom Blech und von der verwendeten Beschichtung ausgewählt wird. Dieser Grenzwert muss nun an einer geeigneter Messstelle überwacht werden. Hierfür ist ein Thermoelement direkt an der Verschraubung befestigt, welche das Target mit der Movingbar verbindet. Auf diese Weise wird nicht direkt die Temperatur auf der bestrahlten Oberfläche des Targets gemessen, sondern auf der durch Wärmeleitung erhitzten Rückseite. Ein weiteres Thermoelement ist im Innenraum der Movingbar angebracht. Aufgrund einer begrenzten Temperaturbeständigkeit der im Innenraum verlaufenden Kabelstränge, Wasserschläuche und Elektronikbauteile, wird hier ein Grenzwert von 80 °C definiert. Ein letztes Thermoelement soll die Wassertemperatur der Radiometerkühlung überwachen. Hierfür ist ein T-Stück im Wasserschlauch integriert, in der ein Thermoelement eingeführt ist. Auch hier darf ein Grenzwert von 80 °C nicht überschritten werden, da die Kunststoffschläuche der Radiometerzuführung lediglich diese Temperaturbeständigkeit aufweisen. Für eine zuverlässige Flussdichtemessung sollte die Kühlwassertemperatur des Radiometers jedoch nicht über 50 °C hinausgehen.

5.1.3 Signalwandlung

Die Signalleitungen der Thermoelemente werden zum Schutz vor Überhitzung durch den Kanal der Luftkühlung nach außen geleitet und zum Schaltschrank geführt. Dort sind Analog-Digital-Wandler angebracht, um die analogen Spannungswerte der drei Thermoelemente in digitale Werte zu überführen. Zum Einsatz kommen hier die Messmodule e.bloxx A1-1 von Gantner Instruments (siehe Abb. 5.2). Sie zeichnen sich durch einen geeigneten Messbereich aus und verfügen über ein Zusatzmodul, e.bloxx Terminal CJC (siehe Abb. 5.3), welches intern die erforderliche Temperaturvergleichsmessung durchführt. Für jedes Thermoelement ist ein eigenes Messmodul mit zusätzlichem Terminal vorhanden.

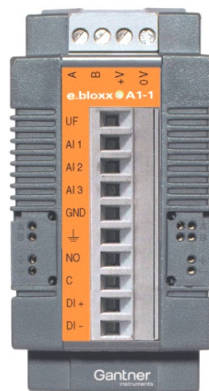


Abbildung 5.2: Universelles Messmodul: Gantner instruments e.bloxx A1-1 [13]



Abbildung 5.3: Gantner instruments e.bloxx Terminal CJC [14]

5.2 Flussdichtemessung

5.2.1 Einbau des Radiometers

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben ist das Radiometer eine notwendige Komponente, um eine Kalibrierung des gesamten Systems durchführen zu können. Im Zuge einer solchen Kalibration wird ein Grauwert auf dem Target mit einem Flussdichtewert des Radiometers zu einem Kalibrationsfaktor verrechnet. Hierfür ist es erforderlich, dass der Grauwert an exakt der gleichen Position aufgenommen wird, wo zuvor die Radiometermessung erfolgt ist. Demnach muss das Radiometer an einer Position installiert werden, welche durch die geringe Bewegungsfreiheit der Movingbar abgedeckt wird. Da das Target 40 cm breiter ist als der Testreceiver und auch der Fahrweg der Movingbar die Höhe des Testreceivers übersteigt, könnte das Radiometer in unmittelbarer Nähe der Receiverfläche positioniert werden. Der Aufwand, das Radiometer nachträglich in die fertige Testreceiveranlage zu integrieren, wäre jedoch sehr hoch. Zudem würde das Radiometer bei Betrieb des Testreceivers dauerhafter Bestrahlung ausgesetzt sein, was die Lebensdauer des Radiometers verringern würde. Eine bessere Lösung ist

deshalb das Radiometer direkt auf der Movingbar zu platzieren. Sowohl der Einbauaufwand, als auch die Strahlungsbelastung wären deutlich geringer. Darüber hinaus würde dies die Flexibilität des Messsystems aufrecht erhalten, da es auch bei nachfolgenden Forschungsprojekten mit neuen Versuchsanlagen zum Einsatz kommen soll.

Als Einbauposition wurde eine Stelle im Strahlungsschutz der Movingbar, oberhalb des Targets ausgewählt (siehe Abb. 5.4). Das Radiometer ist auf einem L-Profil aufgeschraubt, welches zuvor mittig auf der Movingbar befestigt wird. Signalleitung und Wasserschläuche werden zum Schutz vor Strahlung mittels Bohrungen in das Innere der Movingbar hineingeführt. Letztendlich wird das Radiometer inklusive Leitungen in einen Strahlungsschutz eingehüllt, sodass lediglich die Konstantanfolie herausragt.

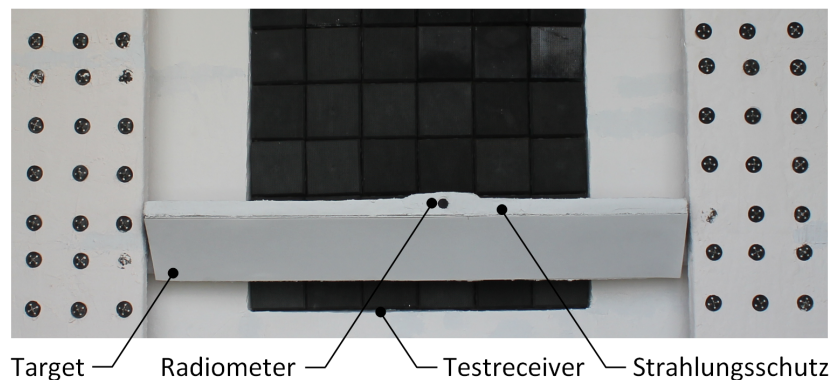


Abbildung 5.4: Einbauposition des Radiometers auf der Movingbar

5.2.2 Signalwandlung

Die Signalleitung des Radiometers wird, gemeinsam mit den Leitungen der Thermoelemente, als Kabelstrang durch den Kanal der Luftkühlung nach außen geleitet und zum Schaltschrank geführt. Das Niederspannungssignal von 0 - 10 mV wird daraufhin von einem Messumformer in ein standardisiertes Stromsignal 4 - 20 mA umgewandelt. Hierfür kommt der ThermoTrans A 20210 von Knick zum Einsatz (siehe Abb. 5.5). Anschließend wird das analoge Stromsignal von einem weiteren e.bloxx-Messmodul (siehe Kap. 5.1.3) in einen digitalen Wert überführt.

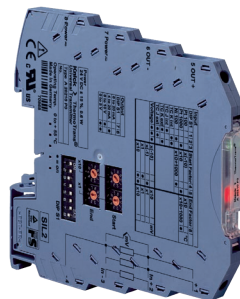


Abbildung 5.5: Messumformer Knick ThermoTrans A 20210 [15]

Wird das analoge Spannungssignal des Radiometers direkt im Messmodul in einen digitalen Wert gewandelt, und somit auf den Messumformer verzichtet, entsteht eine

fehlerhafte Messung. Es ist ein Offset von 0,21 mV zu erkennen was einem Offsetfehler von 21 kW/m^2 entspricht. Dieser ist zudem abhängig vom Zustand der Motorregler. Werden diese aktiv geschaltet, so vergrößert sich der Offset noch zusätzlich. Wird hingegen ein Messumformer verwendet, um das Signal zuvor in ein weniger anfälliges Stromsignal zu wandeln, sind die beschriebenen Fehler nicht mehr zu beobachten.

5.3 Kühlung der Movingbar

5.3.1 Bestrahlungstest mit bestehendem Kühlsystem

Das Konzept zur Kühlung der Movingbar hat eine Luftkühlung über zwei Anschlüsse vorgesehen, die von dem Druckluft-Hausanschluss versorgt werden. Dieses Kühlkonzept konnte nach der Installation der Temperaturüberwachung einem Praxistest unterzogen werden. Am 02.06.2014 ist der erste Bestrahlungstest durchgeführt worden. Die Temperaturentwicklung der drei Messstellen, mit einem kurzzeitigen Ausfall der Aufzeichnung zu Beginn der Messung, sowie die Flussdichte und die Position der Movingbar sind in Abbildung 5.6 aufgetragen. Bei der Bewertung der Funktionsfähigkeit der Movingbarkühlung wird vorerst lediglich die Target- und Innentemperatur betrachtet (rote und grüne Kurve). Die Wassertemperatur (blaue Kurve) ist Teil der Radiometerkühlung, weshalb deren zeitliche Entwicklung im nächsten Kapitel untersucht wird. Auffällig ist zunächst der stetige Anstieg der Innenraumtemperatur bis auf 60°C . Selbst kurzzeitige Strahlungseinbrüche durch bedeckten Himmel und ein Unterlassen von Mo-

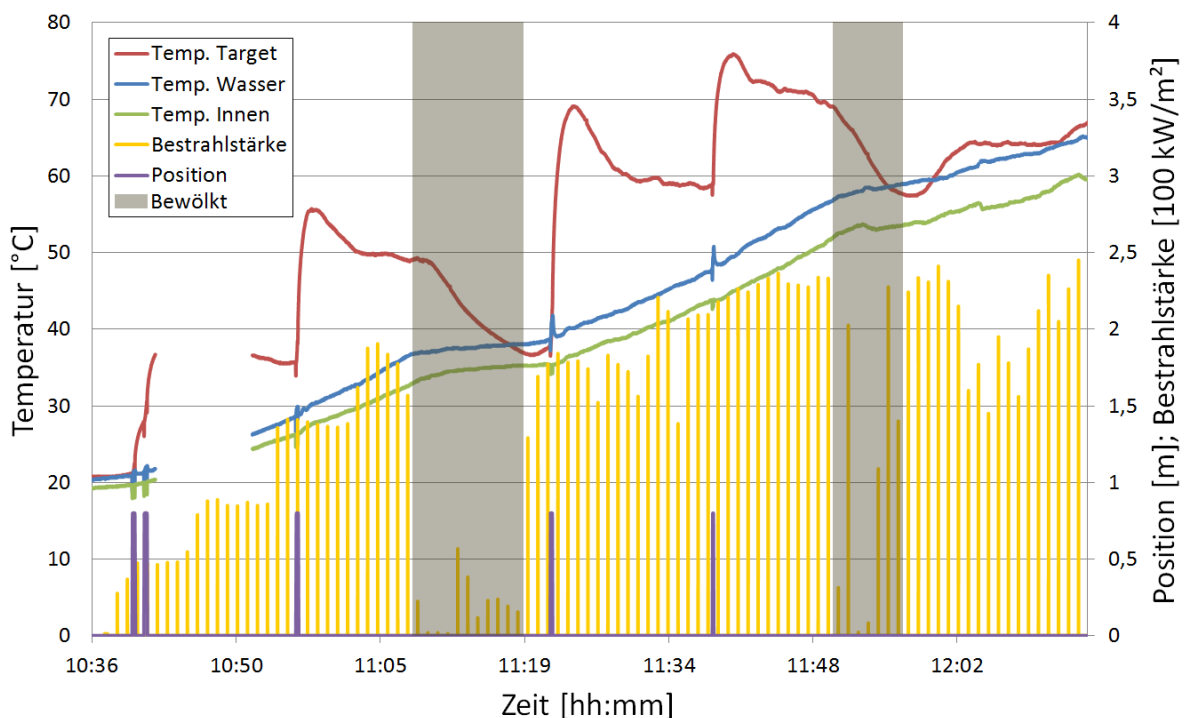


Abbildung 5.6: Temperaturentwicklung beim Bestrahlungstest vom 02.06.2014

vingbarfahrten in den Fokus ab 11:38 Uhr (lila Kurve) haben kein Abkühlen des Innenraums zur Folge. Es ist demnach davon auszugehen, dass der stationäre Zustand der Innenraumtemperatur erst über der kritischen Grenztemperatur von 80 °C eingenommen wird. Dieser müsste jedoch deutlich darunter liegen, da durch Kalibrations- und Messfahrten ein kurzzeitiger Anstieg der Innenraumtemperatur zu erwarten ist, welcher weiterhin unterhalb der Grenztemperatur bleiben muss. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Targettemperatur einen treppenartigen Verlauf zeigt. Mit jeder Fahrt in den Fokus kommt es zu einem deutlichen Temperaturanstieg auf dem Target, was aufgrund der Bestrahlungsleistung auch zu erwarten ist. Jedoch pendelt sich die Temperatur anschließend weit über der Ausgangstemperatur ein, die vor der Fahrt herrschte. Nach der Movingbarfahrt um 11:22 Uhr lässt sich dies sehr deutlich beobachten. Als Ausgangstemperatur kann hier die Temperatur von 50 °C herangezogen werden, die um 11:05 Uhr vor dem Strahlungseinbruch vorzufinden ist. Trotz ähnlicher Bestrahlungsstärken von ca. 175 kW/m² vor und nach dem Wolkendurchzug pendelt sich das Target nach der Fahrt bei einer Temperatur von 60 °C ein.

Um 12:15 ist die Bestrahlung abgebrochen worden, um Beschädigungen an der Movingbar vorzubeugen. Obwohl die Einstrahlung mit Maximalwerten von 250 kW/m² noch deutlich unterhalb späterer Höchstwerte im Versuchsbetrieb lag, war das bestehende Kühlsystem nicht in der Lage den Innenraum der Movingbar unterhalb der definierten Temperaturgrenze zu halten.

5.3.2 Weiterentwicklung des Kühlsystems

Es ist grundsätzlich festzuhalten, dass die Temperaturerhöhung in der Movingbar die zuvor berechneten 4 °C pro Messfahrt deutlich übersteigt. Jedoch ist die Temperaturerhöhung nicht in erster Linie auf die direkte Strahlung aus dem Heliostatfeld im Zuge einer Messfahrt zurückzuführen, denn die Innenraumtemperatur steigt auch ohne den Einfluss direkter konzentrierter Solarstrahlung ab 11:38 Uhr stetig an. Die Temperaturbelastung in der Parkposition scheint vielmehr der Grund dafür zu sein. Um diese Annahme zu überprüfen ist am Folgetag, den 03.06.2014, ein weiterer Bestrahlungstest durchgeführt worden, bei dem die Movingbar zu keinem Zeitpunkt in den Fokus gefahren wurde, sondern dauerhaft in ihrer Parkposition verharret ist. Die Temperaturaufzeichnung ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperaturbelastung in der Parkposition außerordentlich hoch ist. Bei den Messstellen am Target und im Innenraum ist ein starker Anstieg der Temperatur bis auf 50 °C zu verzeichnen, selbst bei einer geringen Bestrahlung von ca. 130 kW/m². Der Grund für das Versagen des bestehenden Kühlsystems liegt demnach darin, dass im Zuge der Berechnung die thermische Belastung in der Parkposition vernachlässigt wurde. Die Wärmestrahlung durch den aufgeheizten Testreceiver, sowie die reflektierte Strahlung am testreceiverumgebenden Strahlungsschutz stellen eine enorme thermische Beanspruchung für die in der Parkposition befindlichen Movingbar dar. Gerade der Strahlungsschutz soll eine möglichst hohe Reflektivität aufweisen, um durch eine geringe Menge absorbierter Strahlung wenig Wärme an den Versuchsaufbau zu übertragen. Diese reflektierte Strahlung könnte nun im Gegenzug für eine unerwartet hohe Temperaturbelastung der Movingbar sorgen. Zudem unter-

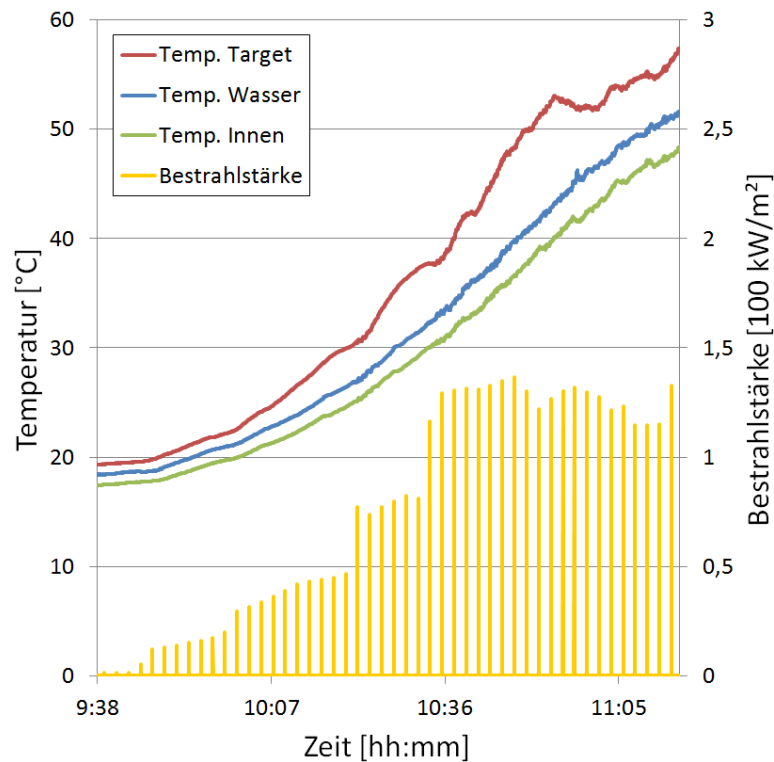


Abbildung 5.7: Temperaturentwicklung beim Bestrahlungstest vom 03.06.2014

liegt ein Teil des Strahlungsschutzes, der auf der Movingbar angebracht ist, direkter Einstrahlung, da die Movingbar wenige Zentimeter aus der Parkposition herausragt. Eine genauere Untersuchung der thermischen Einflüsse ist aufgrund des erwähnten engen Zeitplans nicht möglich, sodass die Beseitigung des Problems oberste Priorität hat. Um dieser Belastung entgegen zu wirken werden zwei Maßnahmen getroffen. Zum einen wird der Verfahrensweg der Linearantriebe durch das Verschieben der Endschalter nach unten hin erweitert. Auf diesem Weg kann eine um 6 cm tiefere Parkposition realisiert werden. Ziel dieser Maßnahme ist die Verringerung der thermischen Belastung, da die Movingbar nun noch weiter von dem heißen Testreceiver entfernt ist und sie zudem vollständig vor direkter Strahlung geschützt ist. Die zweite Maßnahme betrifft das Kühlsystem. Zusätzlich zu der bisherigen Kühlung wird unmittelbar hinter dem Testreceiver ein Gebläse aufgestellt (siehe Abb. 5.8), welches den Luftstrom über einen flexiblen Metallschlauch in die Movingbar leitet. Da die Movingbar beidseitig geöffnet ist, kann sie somit vollständig von kühler Luft durchströmt werden (siehe Abb. 5.9). Dieser Effekt greift allerdings lediglich in der Parkposition, da es, aufgrund des engen Bauraums, nicht möglich ist den Schlauch mitzuführen.



Abbildung 5.8: Position des Gebläses inkl. Schlauchführung



Abbildung 5.9: Schlauchende an der Seitenöffnung der Movingbar

5.3.3 Bestrahlungstest mit optimiertem Kühlsystem

Der Bestrahlungstest mit dem optimiertem Kühlsystem ergab, dass die Maßnahmen den geforderten Effekt im Innenraum der Movingbar bewirkt haben. Um dies zu belegen ist in Abbildung 5.10 die Temperaturentwicklung des Bestrahlungstests vom 31.07.2014 mit hinterlegter Position und Bestrahlungsstärke aufgetragen.

Wesentliche Beobachtung ist der stationäre Wert der Innenraumtemperatur von ca. 50 °C. Selbst unmittelbar hintereinander ausgeführte Kalibrations- und Messfahrten um 12:53 Uhr und 14:23 Uhr lassen die Temperatur um lediglich 15 °C ansteigen, woraufhin der stationäre Wert aber wieder nach wenigen Minuten eingenommen wird. Der Maximalwert liegt mit 65 °C zudem deutlich unterhalb der kritischen 80 °C. Die Targettemperatur ist weniger kritisch aufgrund der hohen Grenztemperatur von 200 °C. Ein treppenartiger Verlauf, wie er noch beim ersten Bestrahlungstest aufgetreten ist, ist allerdings nicht mehr erkennbar. Viel mehr scheint auch die Targettemperatur bei ca 70 °C einen stationären Wert einzunehmen. Hinzukommend sind an diesem Tag mit

Werten bis 370 kW/m^2 deutlich höhere Bestrahlungsstärken erreicht worden, was die Temperaturbeständigkeit auch unter höherer Einstrahlung aufzeigt.

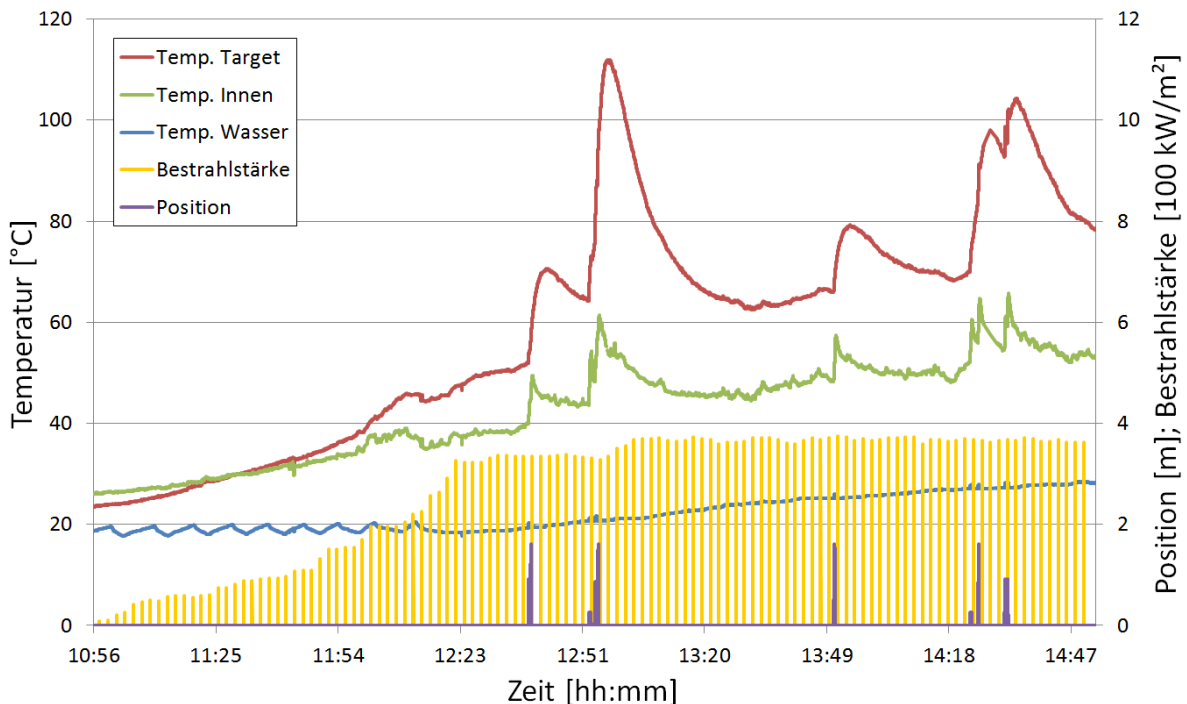


Abbildung 5.10: Temperaturentwicklung beim Bestrahlungstest vom 31.07.2014

5.4 Kühlung des Radiometers

5.4.1 Aufbau des vorgesehenen Kühlsystems

Das Konzept zur Radiometerkühlung sieht einen geschlossenen Wasserkreislauf vor. Der Aufbau dieses Kühlsystems ist in Abbildung 5.11 zu sehen. Das geneigte Target ist hier entfernt worden, sodass ein freier Blick auf die Unterseite der Movingbar ermöglicht wird. Zur Realisierung der Radiometerkühlung ist ein Kunststoffschlauch mit einem Innendurchmesser von 10 mm mehrfach im Innern der Movingbar verlegt und an den Enden mit Steckverbindungen zu einem geschlossenen Kreislauf verknüpft worden. Angetrieben wird der Kreislauf von der Inlinepumpe Comet GIRO. Sie zeichnet sich durch eine kompakte Bauweise und einer Fördermenge von 10 l/min aus. Das Einbringen eines T-Stücks, in welches eines der Thermoelemente eingeführt ist, ermöglicht die Temperaturüberwachung. Das Radiometer, welches oberhalb der Movingbar platziert ist und dessen rote Schutzkappe im mittleren Bild unter dem Blech herausragt, wird über kleinere flexible Schläuche mit dem Kreislauf verbunden. Das Blech weist hierfür an den entsprechenden Stellen Bohrungen auf. Als letzte Überwachungseinheit ist ein Durchflusssensor integriert, um ein Ausfallen der Pumpe frühzeitig zu erkennen. Die Leitungen der Pumpe, des Durchflusssensors und der drei Thermoelemente sind zu einem Kabelstrang zusammengefasst und werden durch den Kühlkanal in den un-

gefährdeten Bereich hinter dem Strahlungsschutz geleitet. Der Blick auf den Eintritt in den Kühlkanal wird in der linken Abbildung durch die Steckverbindung verwehrt.

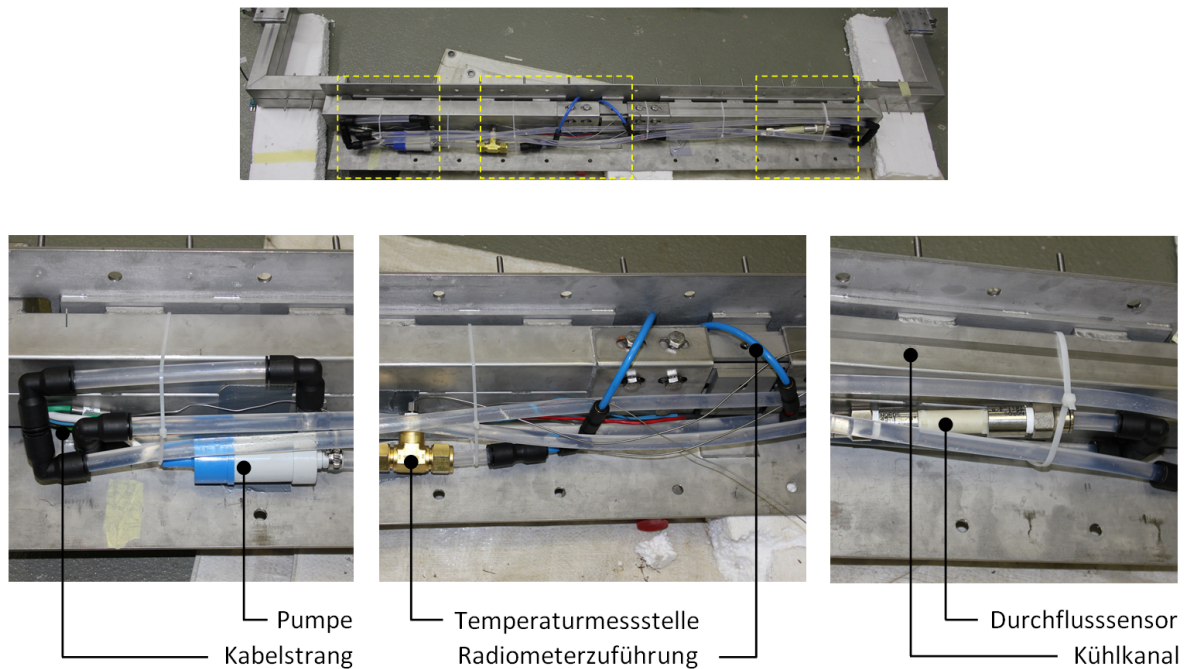


Abbildung 5.11: Kühlkreislauf und Sensorik im Innern der Movingbar

5.4.2 Bestrahlungstest mit vorgesehenem Kühlsystem

Der Bestrahlungstest dieser Radiometerkühlung ist in Abbildung 5.6 zu erkennen. Die Temperatur der Wasserkühlung (blaue Kurve) steigt, gemeinsam mit der Innenraumtemperatur, kontinuierlich an und übersteigt bereits um 11:41 Uhr die 50 °C. Als Grund kann, analog zur Movingbarkühlung, der unterschätzte Temperatureinfluss der Parkposition angeführt werden. Das vorgesehene Konzept zur Kühlung des Radiometers ist somit nicht in der Lage die geforderten Temperaturen bei Bestrahlung zu halten.

Nach Optimierung der im Kapitel 5.3.2 beschriebenen Movingbarkühlung ist ein weiterer Bestrahlungstest durchgeführt worden, jedoch ist auch die optimierte Kühlung des Innenraums mit Hilfe des Gebläses nicht in der Lage einen uneingeschränkten Betrieb zu gewährleisten. Zwar ist der erzeugte Luftstrom stark genug, um in der Parkposition mehr Wärme aus dem Wasserkreislauf abzuführen als durch die Wärmestrahlung und reflektierte Strahlung in der Parkposition aufgenommen wird, sodass es nach einer Fahrt in den Fokus zu einem Abkühlen der Wassertemperatur kommt, jedoch benötigt diese Abkühlphase ca. 40 min bevor eine erneute Messung durchgeführt werden kann. Dies würde den Betrieb der Movingbar einschränken, weshalb die Wasserkühlung des Radiometers ebenfalls einer separaten Optimierung bedarf.

5.4.3 Weiterentwicklung und Bestrahlungstest mit optimiertem Kühlsystem

Am Hauptreceiver des Solarturms werden ebenfalls Radiometer mit Wasserkühlung eingesetzt, um die Einstrahlung abschätzen zu können. Diese werden über ein separates Kühlaggregat gekühlt. Da bereits eine leistungsfähige Kühlung vorhanden ist, besteht die Optimierung nun darin die Wasserleitungen des Radiometers aus der Movingbar heraus zu führen und diese an die Vor- und Rücklauf des Kühlaggregats anzuschließen. Der Bestrahlungstest vom 31.07.2014 in Abbildung 5.10 zeigt die Funktionsfähigkeit der optimierten Kühlung. Die Wassertemperatur steigt im Laufe von mehrerer Stunden nur sehr langsam an, übersteigt aber zu keinem Zeitpunkt eine Wassertemperatur von 30 °C und liegt damit deutlich unter den geforderten 50 °C.

5.5 Integration der Kamera

Die bereits vorhandene Kamera muss anforderungsgerecht in das Gesamtsystem der Messeinrichtung integriert werden. Eine Kameraposition im Feld, eine fehlerfreie Kommunikation zum Messrechner, eine Wetterbeständigkeit in jeder Jahreszeit, sowie ein von der Außentemperatur unbeeinflusstes Messergebnis sind hierbei die wesentlichen Anforderungen.

Für die Kameraposition im Feld wird ein bereits installierter Kameramast verwendet. Da anfangs nur ein Kameragehäuse auf diesem Kameramast angebracht werden konnte, wurde zuvor eine Erweiterung konstruiert und angefertigt, um weitere Kameras installieren zu können (siehe Abb. 5.12). Die genaue Position im Heliostatfeld kann in Abbildung 7.3 eingesehen werden.

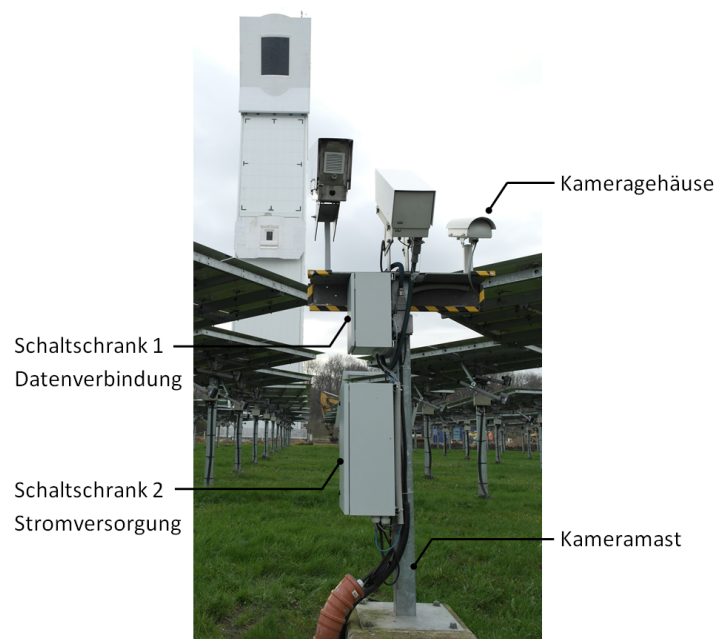


Abbildung 5.12: Kameramast mit aufgeschraubtem Kameragehäuse

Die fehlerfreie Kommunikation über eine Kabellänge von ca. 150 m wird über ein Glasfaserkabel realisiert. Das Ethernetkabel der Kamera wird hierfür in Schaltschrank 1 geführt und dort gewandelt.

Zur Wetterbeständigkeit der Kamera wird diese in ein Kameragehäuse integriert. Ausgewählt wurde hierfür das Kameragehäuse Videotec Verso. Es bietet mit einer Schutzklasse von IP67 und einem Stoßfestigkeitsgrad von IK10 einen idealen Schutz selbst vor Starkregen und hohen Windgeschwindigkeiten. Mittels einer geeigneten Gehäuseschalterung ist diese auf dem Kameramast montiert worden und mit Blick auf die Forschungsebene ausgerichtet.

Hinter der letzten Anforderung, ein von der Außentemperatur unbeeinflusstes Messergebnis, verbirgt sich das Dunkelstromsignal, welches abhängig von der Temperatur des Sensors ist. Je höher diese ansteigt, desto größer wird das Dunkelstromsignal (genaue Erklärung folgt in Kap. 6.5.2). Da das Messsystem und damit auch die Kamera lediglich bei klarem Himmel und hohen Einstrahlungswerten genutzt wird, gilt es im Sommer ein Aufheizen des Gehäuseinnenraums durch die Bestrahlung zu unterbinden. Ebenso sollten die Innenraumtemperatur bei Forschungsbetrieb im Winter nicht zu stark abfallen. Hier kommen nun weitere Eigenschaften des ausgewählten Gehäuses zur Geltung. Es enthält ein Heizelement und einen Lüfter, um die Innenraumtemperatur in einem Bereich zwischen 15 °C und 35 °C zu halten.

5.6 Aufbau des Messsystems

Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus den vier folgenden Elementen: Kamera, Movingbar, Schaltschrank und Messrechner. Nahezu der gesamte Aufbau ist direkt auf der Forschungsebene vorzufinden, mit Ausnahme der Kamera, die sich im Heliostatfeld befindet (siehe Abb. 5.13). Sie ist von einem wetterfesten Kameragehäuse umgeben und auf die Forschungsebene des Solarturms ausgerichtet. Das Ethernetsignal einer Aufnahme wird mit Hilfe eines Medienkonverters von Digitus in ein Glasfasersignal umgewandelt, um die große Distanz zwischen Kamera und Messrechner zu überbrücken. Um die Signalwandlung vor dem Messrechner wieder rückgängig zu machen kommt ein weiterer Medienkonverter zum Einsatz, sodass der Messrechner letztlich wieder über ein Ethernetkabel die Verbindung zur Kamera herstellen kann. Da die Glasfaserleitung von weiteren Messeinrichtungen genutzt wird, ist die Größe pro gesendetem Datenpaket (engl. `paketsize`) reduziert worden, weil es zu Kommunikationsproblemen gekommen ist. Diese Maßnahme wirkt sich in keiner Weise auf die Funktionalität des Messsystems aus.

Die verbliebenen drei Elemente sind auf der Forschungsebene anzutreffen. In Abbildung 5.14 ist der Aufbau auf der Forschungsebene vereinfacht dargestellt. Sie ist in einen Vorbereitungs- und einen Laborraum aufgeteilt. Movingbar und Schaltschrank sind direkt an der Testreceiveranlage platziert und befinden sich somit im Laborraum, während der Messrechner im Vorbereitungsraum positioniert ist. Die Konstruktion der Movingbar ist fest mit der Testreceiveranlage verbunden. Aufgrund der vereinfachten Darstellung ist dies ebenso wenig zu erkennen, wie die Tatsache, dass sich die Linearantriebe im Strahlungsschutz hinter dem Testreceiver befinden. Entscheidend ist die

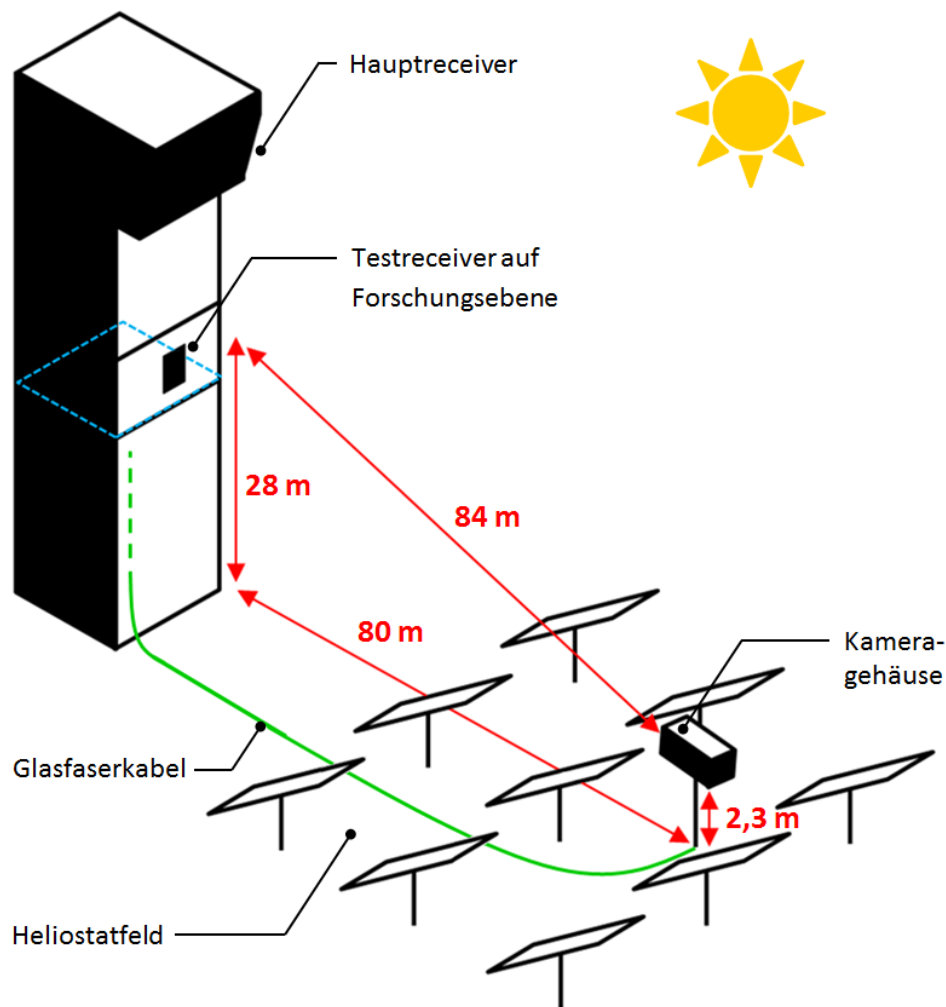


Abbildung 5.13: Aufbau des Messsystems im Heliostatfeld

Movingbar, die vor dem Testreceiver verfährt und hierbei von der Kamera im Feld aufgenommen wird. Die Antriebe sind jeweils über Kabelstränge mit dem Schaltschrank verbunden, um sowohl die Stromversorgung, als auch die Kommunikation zu gewährleisten. Unter Kommunikation sind einerseits Fahrbefehle von den im Schaltschrank befindlichen Antriebsreglern an die Motoren und andererseits die Übermittlung der Sensorwerte, wie Position und Geschwindigkeit, vom Motor an die Regler gemeint. Die bereits beschriebene Sensorik in der Movingbar wird über einen separaten Kabelstrang in den Schaltschrank geleitet, um dort von den Messmodulen ausgelesen zu werden. Alle notwendigen Informationen werden anschließend über zwei Ethernetverbindungen vom Schaltschrank zu dem Messrechner geführt. Eine Leitung transportiert die Informationen der Antriebe und gibt gleichzeitig Fahrbefehle zurück, während die zweite Leitung die Temperatur- und Flussdichtewerte aus den Messmodulen übermittelt. Der Messrechner ist somit die zentrale Steuereinheit, in dem die Kamera ausgelesen und angesteuert wird, Informationen der Antriebe gelesen und neu gesetzt werden und die Überwachung der Temperaturen erfolgt.

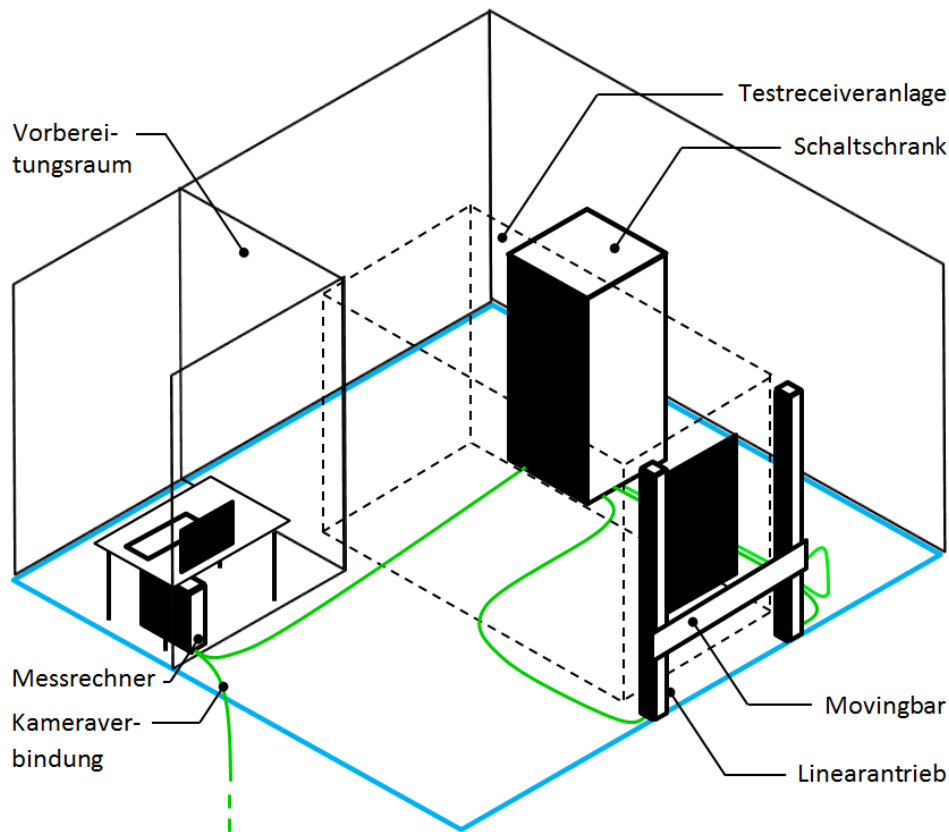


Abbildung 5.14: Aufbau des Messsystems auf der Forschungsebene

5.7 Neigungswinkel des Targets

Erste Messungen mit dem fertig gestellten Messsystem zeigen eine Flussdichteverteilung mit horizontal abgesetzten Linien in fest definierten Abständen (siehe Abb. 5.15). Das Bild der Flussdichteverteilung stellt hier einen Vorgriff aus dem Kapitel 6.3.2 dar, in welchem der genaue Ablauf einer Messung, sowie das Zusammenfügen der Bilder im Einzelnen erklärt ist. Unabhängig von den genannten Linien ist ein vertikaler Schatten zu erkennen, der durch ein weiteres Radiometer erzeugt wird, welches vor dem Testreceiver montiert ist. Dies hat im Zuge der parallelen Entwicklungs- und Versuchsphase Verwendung gefunden und ist nun auf allen folgenden Flussdichtemessungen zu erkennen, soll bei den weiteren Ausarbeitungen allerdings keine Beachtung finden.

Die anfangs erwähnten horizontalen Linien entspringen der Zusammensetzung der Flussdichteverteilung aus zehn Einzelaufnahmen. Obwohl Fokus und Flussdichteverteilung gut erkennbar sind, entsprechen diese kontrastreichen Linien offensichtlich nicht der realen Flussdichteverteilung. Rechtsseitig der Markierung für die maximale Flussdichte ist beispielhaft ein Sprung von 30 kW/m^2 erkennbar. Diese Unstetigkeiten in vertikaler Richtung führen zu fehlerhaften Ergebnissen.

Grund für das Auftreten dieser fehlerhaften Übergänge zwischen den einzelnen Aufnahmen ist das geneigte Target. Je nach Ausführung des Messvorgangs führt es dazu, dass Teile der vom Heliostatfeld kommenden Solarstrahlung doppelt oder überhaupt nicht

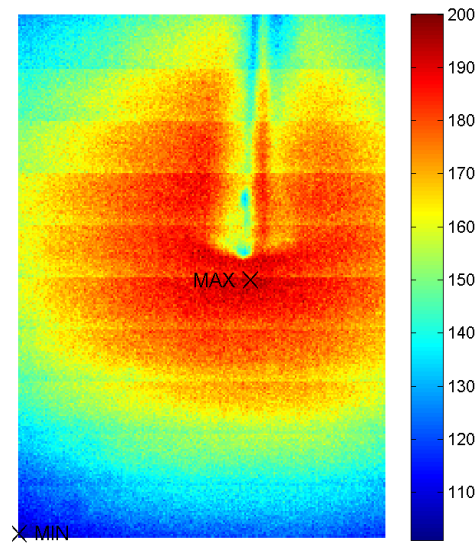


Abbildung 5.15: Flussdichtemessung mit geneigtem Target

detektiert werden. Der verwendete Messvorgang gepaart mit einer im Heliostatfeld positionierten Kamera führt dazu, dass die Strahlung von Heliostaten, die näher zum Solarturm positioniert sind, teilweise doppelt detektiert werden, während die Strahlung von Heliostaten hinter der Kamera teilweise überhaupt nicht erfasst werden.

In Abbildung 5.16 ist eine erklärende Zeichnung für den Fall der doppelt detektierten Strahlung abgebildet. Die Strahlung (gelbe Linien) mit dem Elevationswinkel β kommt hier von einem Heliostat, der vor der Kamera steht, sodass die Blickrichtung der Kamera (blaue Linien) einen Elevationswinkel α aufweist, der geringer ist als der

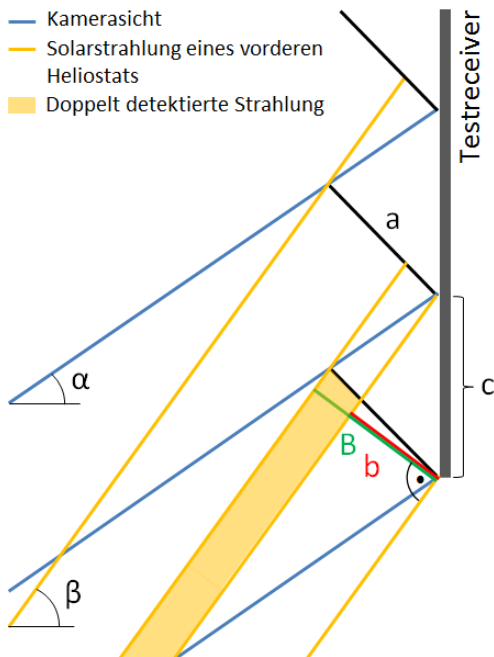


Abbildung 5.16: Doppelte Detektion von Solarstrahlung

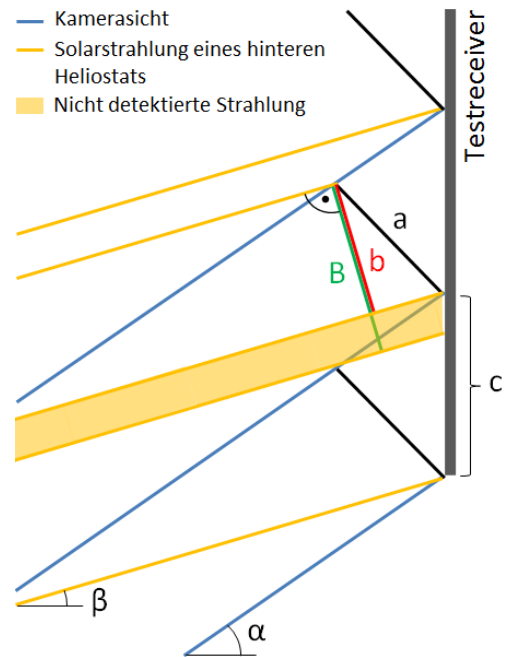


Abbildung 5.17: Unterlassene Detektion von Solarstrahlung

Einstrahlwinkel β . Trifft nun diese Winkelkonstellation auf das geneigte Target, so wird ein Teil der Strahlung sowohl in der ersten Position der Movingbar detektiert, als auch in der zweiten Position, sodass ein Teil der Strahlung die auf den Testreceiver trifft zweifach ausgewertet wird. Unter sehr steilen Einstrahlwinkeln ist es möglich, dass dieselbe Strahlung auch auf mehr als zwei Movingbarpositionen detektiert wird, jedoch können solche Einstrahlwinkel mit dem Heliostatfeld nicht erreicht werden, sodass lediglich eine doppelte Detektion auftritt.

Abbildung 5.17 zeigt den gegenteiligen Effekt. Betrachtet wird nun ein Heliostat der hinter der Kamera positioniert ist, sodass der Elevationswinkel α nun größer ist als der Winkel β . Zwischen den einzelnen Positionen der Movingbar trifft nun Strahlung auf den Testreceiver, welche durch das Target nicht erfasst wird.

Bei der Flussdichteverteilung in Abbildung 5.15 kommt es vorwiegend zur doppelten Detektion. Der obere Bereich eines Ausschnitts weist bei allen Übergängen eine höhere Flussdichte auf, als der untere Bereich des darüberliegenden Ausschnitts. Wird die Verteilung von unten nach oben hin durchlaufen kommt es somit fortwährend zu abfallenden Flussdichten an den Übergängen. Bei unterlassener Strahlungsdetektion würden positive Sprünge bei ansteigender und negative Sprünge bei fallender Flussdichte auftreten.

Um diesen Fehler zu quantifizieren ist eine Berechnung durchgeführt worden. Die gesuchte Größe ist zum einen die gesamte Breite B eines Strahls, die zwischen den einzelnen Movingbarpositionen zu erfassen ist und die Breite b als der Teil der Strahlung, der fehlerfrei detektiert wird. Aus der Differenz dieser Größen lässt sich anschließend der Fehler berechnen.

Als Berechnungsgrundlage dient der Abstand c zwischen den einzelnen Positionen der Movingbar, der durch die Anzahl an Aufnahmen festgelegt wird. Bei einer Anzahl von 10 zu tätigen Aufnahmen und einer Höhe des Testreceivers von 130 cm ergibt sich ein Abstand von 13 cm zwischen den einzelnen Positionen der Movingbar. Einerseits lässt sich direkt die Breite b berechnen:

$$b = c \cdot \sin(90^\circ - \beta) \quad (5.1)$$

Andererseits kann die Höhe a des Ausschnitts aus den einzelnen Aufnahmen der Movingbar mit folgender Formel berechnet werden:

$$a = c \cdot \frac{\sin(90^\circ - \alpha)}{\sin(45^\circ + \alpha)} \quad (5.2)$$

Die Breite B lässt sich nun mit

$$B = a \cdot \sin(45^\circ - \beta) \quad (5.3)$$

berechnen, sodass abschließend der relative Fehler F_r ermittelt werden kann.

$$F_r = \frac{B - b}{B} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

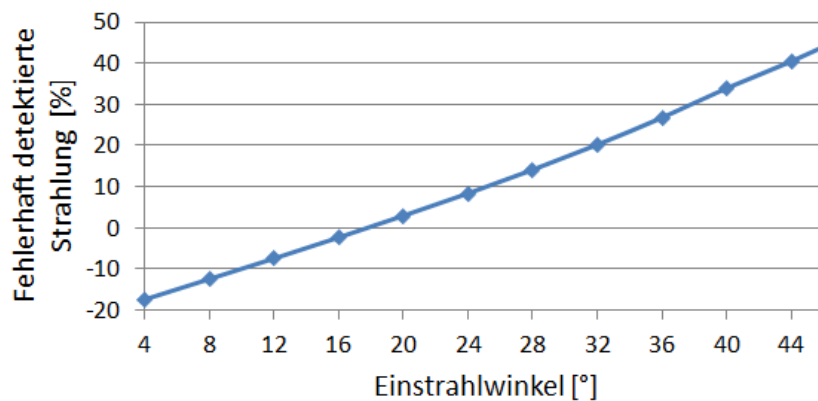


Abbildung 5.18: Relativer Fehler der detektierten Solarstrahlung in Abhängigkeit zum Einstrahlwinkel bei 10 Einzelaufnahmen

Wird der Elevationswinkel der Kamera $\alpha = 17,8^\circ$ und die Einstrahlwinkel der Heliostate zwischen $4,5^\circ \leq \beta \leq 46^\circ$ zu Grunde gelegt, ergeben sich relative Fehler zwischen $-17,5\% \leq F_r \leq 44\%$ (siehe Abb. 5.18). Bei einem Einstrahlwinkel von $\beta = \alpha = 17,8^\circ$ durchläuft die Kurve die Nulllinie.

Da sich der Fehler aufgrund der vielen Heliostate an jeweils unterschiedlicher Position selbst mit einem erheblichen Aufwand nur zum Teil rechnerisch korrigieren lässt, muss der Fehler durch einen Umbau der Movingbar behoben werden. Hierbei ist das für die Neigung verantwortliche Blech mit einer Biegewinkel von 45° entnommen worden und durch ein Blech mit einem Winkel von 90° ersetzt worden (siehe Abb. 5.19). Am unteren Ende des Bleches sind anschließend Verstrebungen zum ursprünglichen Teil der Konstruktion angebracht worden, um die Steifigkeit des Targets zu gewährleisten.



Abbildung 5.19: Senkrechtes Target nach Umbau der Movingbar

Anschließende Messungen zeigen nun eine deutlich verbesserte Flussdichteverteilung (siehe Abb. 5.20). Zwar lassen sich die einzelnen Ausschnitte im Fokusbereich immer noch erkennen, allerdings ohne fehlerhafte Sprünge im Flussdichtebild zu verursachen.

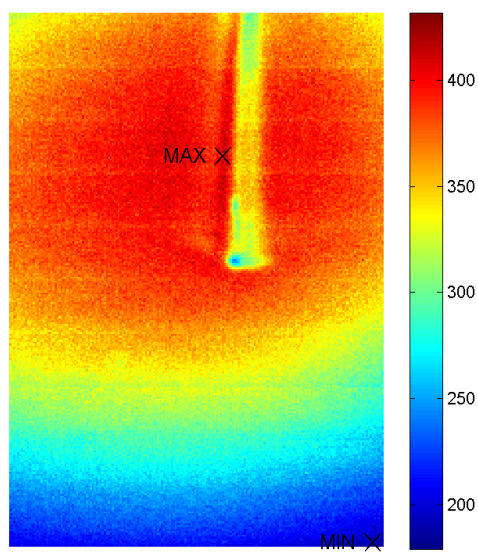


Abbildung 5.20: Flussdichtemessung mit senkrechtem Target

6 Programmierung des Messsystems

Die Programmierung des Messsystems stellt den Hauptanteil der Aufgabenstellung im Rahmen der Masterthesis dar. Um dieser Tatsache gerecht zu werden, soll ausführlichst auf die Umsetzung eingegangen werden. Zuerst wird hierbei die Notwendigkeit und der Einsatz der OPC-Software erklärt. Anschließend wird die Bedienoberfläche mit ihren Visualisierungen und Eingabemöglichkeiten erläutert, ohne jedoch im Detail auf die internen Abläufe einzugehen. Diese werden im darauffolgenden dritten Abschnitt dargelegt.

6.1 OPC-Server

In Kapitel 5.6 wurde der Aufbau des Messsystems beschrieben. Während die Steuerung der Antriebe im Schaltschrank verbaut ist, soll die Bedienung hingegen von einem Messrechner aus erfolgen, welcher im Vorbereitungsraum platziert ist. Um dies zu ermöglichen ist eine Kommunikation zwischen der verwendeten Steuerung (Siemens SIMATIC S7-300) und dem Messrechner erforderlich, da sowohl aktuelle Zustände des Messsystems bereitgestellt, als auch Befehle an das System übergeben werden müssen. Die Kommunikation muss demnach im Stande sein Variablen aus der Steuerung zu lesen und sie neu zu beschreiben.

Verbunden werden Messrechner und Steuerung über ein Ethernet-Kabel, jedoch ermöglicht allein diese Kabelverbindung noch keinen Zugriff auf die Daten in der Steuerung. Hierfür kommt eine OPC-Software-Schnittstelle zum Einsatz. OPC steht für **O**bject **L**inking and **E**mbedding for **P**rocess **C**ontrol und besitzt die besondere Eigenschaft ohne spezifische Treiber auf Datenquellen zugreifen zu können, um sie sowohl auszulesen als auch zu beschreiben. Dies wird ermöglicht, indem die Software die Implementierungseigenschaften der Datenquelle und auch des Datenempfängers abstrahiert, sodass Daten zwischen ihnen ausgetauscht werden können, ohne dass sie etwas über die interne Datenorganisation und Kommunikation des anderen wissen müssen. Die OPC-Technologie wird aus diesem Grund häufig in der Automatisierungsindustrie angewendet, da beliebig viele Komponenten unterschiedlicher Hersteller mit einer Schnittstelle ausgelesen und angesteuert werden können. Selbst nachträgliche Systemerweiterungen lassen sich auf diese Weise ohne Komplikationen einbinden. [30]

Abbildung 6.1 stellt die Funktionsweise des OPC-Servers in diesem konkreten Anwen-

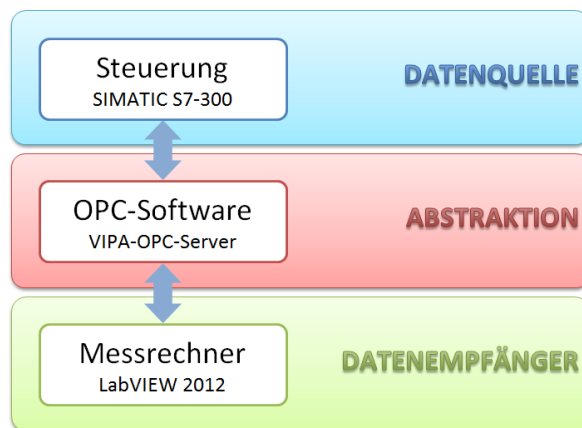


Abbildung 6.1: Funktionsweise eines OPC-Servers

dungsfall dar. Die Datenquelle ist die SIMATIC S7-300, während der Messrechner mit seiner LabVIEW-Bedienoberfläche als Datenempfänger fungiert. Die Kommunikation zwischen diesen beiden Komponenten übernimmt ein OPC-Server der VIPA GmbH, der durch Abstraktion eine Kommunikation in beide Richtungen ermöglicht. Somit können sowohl Informationen aus der Steuerung zum Messrechner übertragen werden, als auch Befehle vom Messrechner in die Steuerung.

Nach Installation der Software muss ein Kommunikationstreiber aus drei Wahlmöglichkeiten bestimmt werden, woraufhin unter Angabe der SPS IP-Adresse die Verbindung zur SPS aufgebaut wird. Anschließend können die in der SPS vorhandenen Variablen nach belieben beobachtet werden. Hierfür genügt es die Verschaltung einer bestimmten Variable (z.B.: “MD1“ für einen Merker vom Typ Double) anzugeben und das Zugriffsrecht zu definieren. Die Verschaltung ist für den OPC-Server der entscheidende Hinweis, um die Verbindung zur Variable aufbauen zu können, während über das Zugriffsrecht entschieden wird, ob die Variable nur gelesen oder auch beschrieben werden kann. Handelt es sich bei der Variable um einen Messwert, wie die Position der Movingbar, kann diese nur gelesen werden, eine Befehlsvariable hingegen, wie der Schaltzustand der Steuerung, muss gelesen und neu beschrieben werden können. Zuletzt kann der entnommenen Variable ein neuer aussagekräftigerer Name vergeben werden.

Sollen diese Variablen anschließend in LabVIEW bereitgestellt werden, muss lediglich der VIPA OPC-Server in der Konfiguration eines sogenannten I/O-Servers ausgewählt werden. Alle auf dem Rechner installierten OPC-Server werden in dieser Auswahl gelistet. Voraussetzung hierfür ist die Engine für Umgebungsvariablen, welche als Zusatzpaket vorhanden sein muss. Diese Engine liest nun die im VIPA OPC-Server aufgenommenen Variablen aus und stellt sie dem LabVIEW Nutzer in Form von Umgebungsvariablen bereit (siehe Abb. 6.2). [31]

6.2 Bedienoberfläche im Frontpanel

Die Bedienung des Messsystems soll durch eine übersichtliche Darstellung eine intuitive Nutzung gewährleisten. Hier erweist sich die genutzte Entwicklungsumgebung Lab-

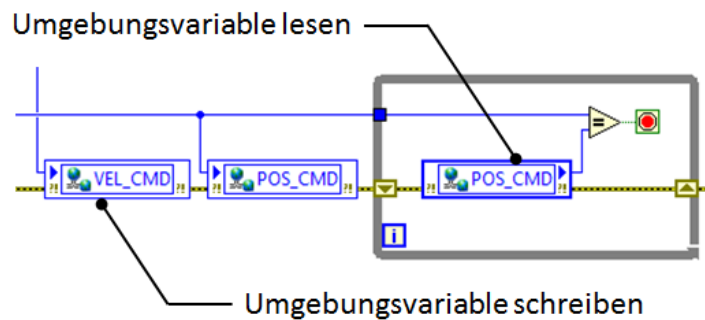


Abbildung 6.2: Blockdiagramm: Kommunikation mit Umgebungsvariablen

VIEW durch die Aufteilung in Frontpanel und Blockdiagramm (siehe Kap 2.2.1) als geeignet, da viele Visualisierungswerkzeuge zur Verfügung stehen. In Abbildung 6.3 ist die im Frontpanel aufgebaute Bedienoberfläche dargestellt. In ihrer Höhe und Breite ist die Oberfläche exakt an die Abmessungen der verwendeten Monitore im Vorbereitungsraum angepasst, sodass im Vollbildmodus der komplette Monitor ausgefüllt und verwendet wird. Sie unterteilt sich im Wesentlichen in einen linken Teil zur Überwachung des Systems und einen rechten Teil um Messungen vorzubereiten und durchzuführen.

6.2.1 Reiter Systemüberwachung

Die Systemüberwachung ist wiederum in fünf Bereiche gegliedert. Im Bereich “Kontrollleuchten” lässt sich die Antriebssteuerung der Motoren für die Movingbar im Schaltschrank einschalten, wobei im Grunde ein Umschalten von manuellen auf automatischen Betrieb erfolgt. Desweiteren lässt sich die Datenaufzeichnung einschalten, woraufhin Position und Geschwindigkeit der Movingbar, Temperaturen, Flussdichte und Uhrzeit fortlaufend in einer csv-Datei abgelegt werden. Die übrigen LED’s dienen der Überwachung von Schaltschrank, Antrieben und Programmablauf. In den weiteren Bereichen “Temperaturwerte”, “Flussdichte” und “Position Movingbar” werden aktuelle Messwerte sowohl numerisch als auch graphisch dargestellt. Zu sehen sind die Temperaturen der Movingbar an den drei Messstellen am Target (rote Kurve), im Innenraum (grüne Kurve) und im Kühlwasser (blaue Kurve). Im letzten Bereich “Einzelfahrt” kann die Movingbar mit einer frei wählbaren Geschwindigkeit an eine beliebige Position oder mit einer erhöhten Geschwindigkeit sofort auf die Parkposition gefahren werden.

Auf der rechten Seite wird im Reiter “Kamerabild” ein Live-Bild der Kamera angezeigt. Obwohl dies im rechten Bereich der Bedienoberfläche und damit im Bereich zur Vorbereitung und Durchführung von Messungen platziert ist, kann das Bild auch gut zur Überwachung verwendet werden. So lassen sich Schäden am Target, Testreceiver oder Strahlenschutz frühzeitig erkennen. Zudem nimmt das Kamerabild eine Kontrollfunktion für die Bediener des Testreceivers und des Messsystems ein, da sie sich durch das Live-Bild nicht allein auf die Graphen im Überwachungsfenster verlassen müssen, sondern ein direktes Bild von der Bestrahlungssituation haben, die anderweitig nicht einzusehen ist. Der Nutzen des Live-Bildes für die Messvorbereitung wird im folgenden Abschnitt erklärt.

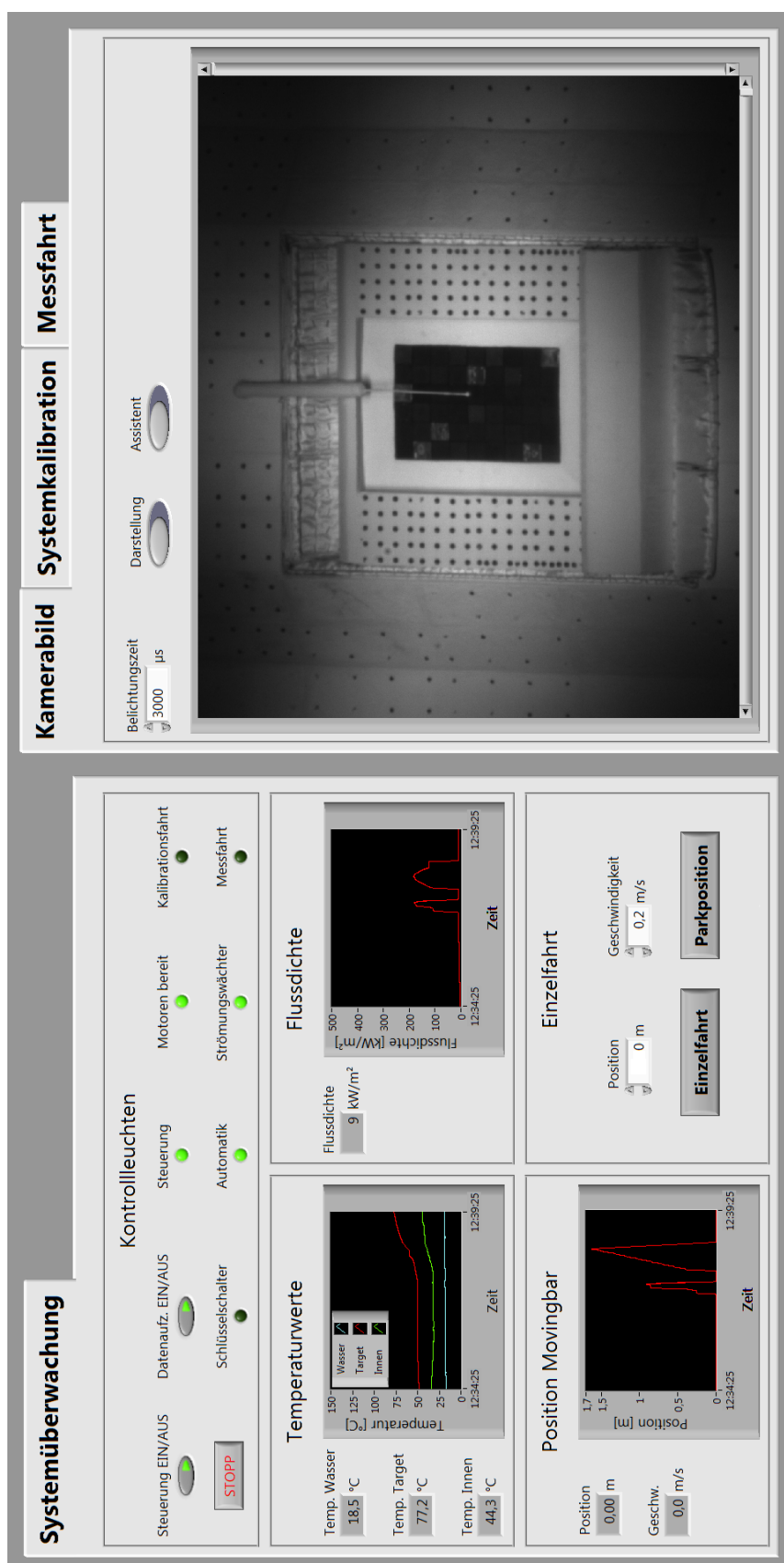


Abbildung 6.3: Bedienoberfläche des Messsystems

6.2.2 Reiter Kamerabild

Neben der Überwachungsfunktion kommt dem Reiter “Kamerabild“ eine weitere entscheidende Funktion zu: das Einstellen der Belichtungszeit. Dies ist ein wesentlicher Bestandteil der Messvorbereitung, da die Belichtungszeit eine entscheidende Größe für eine sinnvolle und gute Ausnutzung des Messbereichs der Kamera und damit für die gesamte Messgenauigkeit darstellt. Wird sie zu hoch gewählt entsteht ein überbelichtetes Bild und damit eine einheitlich weiße Flächen auf dem Target, während eine zu kurze Belichtungszeit schwarze Flächen nach sich ziehen kann. In beiden Fällen ist ein fehlerhaftes Ergebnis die Folge. Eingestellt werden kann die Belichtungszeit in dem entsprechenden Eingabefenster. Belichtungszeiten von $10\ \mu\text{s}$ bis hin zu 1 s sind möglich, jedoch liegt sie in Bestrahlungssituationen zwischen $50\ \mu\text{s}$ und $150\ \mu\text{s}$. Die in der Abbildung dargestellte Belichtungszeit von $3000\ \mu\text{s}$ ist mit einer äußerst geringen Bestrahlungsstärke zu erklären.

Um dem Bediener das Einstellen der Belichtungszeit zu erleichtern ist ein Assistent programmiert worden, der über ein Schalter aktiviert werden kann (siehe Abb. 6.4). Nach Einschalten des Belichtungszeitassistenten erscheinen, zusätzlich zu den bisherigen Objekten, eine LED neben dem Eingabefenster für die Belichtungszeit, ein Graph auf der rechten Seite oberhalb des Live-Bildes und zwei vertikale Linien in dem Kamerabild. Die beiden Linien werden in unterschiedlichen Farben, rot und grün, angezeigt. In dem Graphen werden nun die Grauwerte entlang der beiden Linien aufgetragen, wobei die unterschiedlichen Farben dabei helfen die beiden Kurven voneinander zu unterscheiden und den Linien im Kamerabild zuzuordnen. Die vertikalen Linien sind hierbei auf dem weißen Strahlungsschutz rechts und links neben dem Testreceiver platziert, um die Reflexion der aktuellen Bestrahlungssituation auf einer weißen Oberfläche, ähnlich der des Targets, zu erhalten. Die Positionierung der Linien ist hierbei mit der Kalibration der

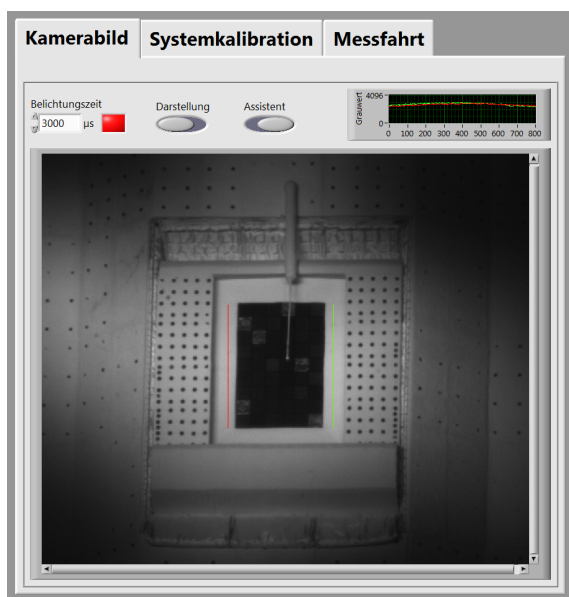


Abbildung 6.4: Reiter “Kamerabild“ mit eingeschaltetem Belichtungszeitassistent

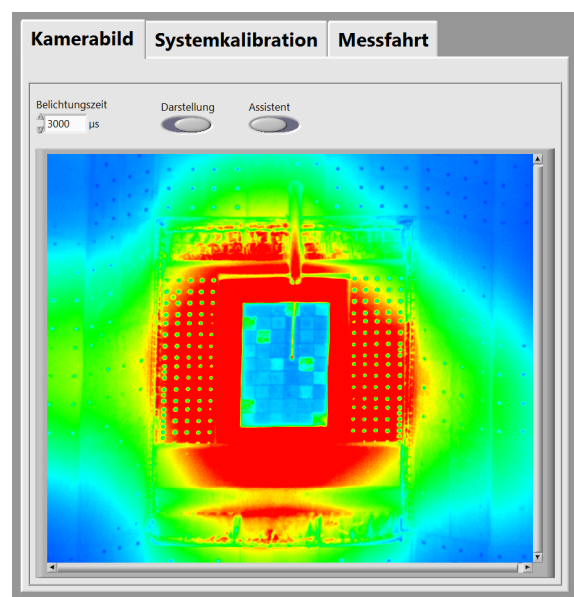


Abbildung 6.5: Reiter “Kamerabild“ mit aktivierter Falschfarbendarstellung

Kameraposition gekoppelt, sodass sie selbst bei einem Verrücken des Kameragehäuses im Feld die gleiche relative Position zum Testreceiver einnehmen. Liegen die Grauwerte nun innerhalb eines zuvor definierten Grauwertbereichs wird die LED auf grün geschaltet. Die in der Abbildung 6.4 festgehaltene Grauwertentwicklung im Graphen überschreitet diese definierten Grenzwerte jedoch, weshalb die LED rot aufleuchtet. Zwar liegen die Grauwerte noch deutlich unter dem Höchstwert von 4096, es ist aber zu erwarten, dass die Helligkeit im Fokus noch zunimmt, sodass ein Sicherheitsabstand gewahrt werden muss. Auf diesem Wege kann eine Vorauswahl der Belichtungszeit getroffen werden ohne die Movingbar in den Fokus zu bewegen und eine direkte Untersuchung auf dem Target vorzunehmen.

Die Auswahl der genauen Grenzwerte soll gesondert erläutert werden. Der gravierende Messfehler, der durch ein Über- oder Unterbelichten entsteht und weiße oder schwarze Flächen verursacht, ist bereits beschrieben worden. Kommen die Grauwerte jedoch nur in die Nähe der Grauwertgrenzen von 0 oder 4096 entsteht ebenfalls ein Fehler aufgrund der nachlassenden Linearität. Nur im linearen Bereich der Kamera ist es möglich, mittels Gleichsetzen eines bestimmten Grauwertes mit einer gemessenen Flussdichte im Zuge der Kalibration, fehlerfrei auf weitere Flussdichten zu schließen. Aus diesem Grund ist die Linearität der verwendeten Kamera untersucht worden. Ein lineares Verhalten besagt, dass bei einer Erhöhung der Lichtmenge, der Grauwert im gleichen Verhältnis ansteigt. Da keine regelbare Lichtquelle zur Verfügung steht ist die in die Kamera einfallende Lichtmenge über die Belichtungszeit reguliert worden. Eine doppelte Belichtungszeit führt demnach zu einer doppelten Lichtmenge, sofern die fotografierte Fläche eine gleichmäßige und konstante Helligkeit aufweist. Dies wurde mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel gewährleistet. Die Hohlkugel weist eine innen diffus reflektierende weiße Beschichtung mit einer internen Lichtquelle auf. Durch eine für die Kamera vorgesehene Öffnung können nun Aufnahmen von der Innenwand getätigt werden, die, aufgrund der vielfachen Reflexion der Lichtstrahlen an der Innenwand, einer ideal weißen Fläche sehr nahe kommen.

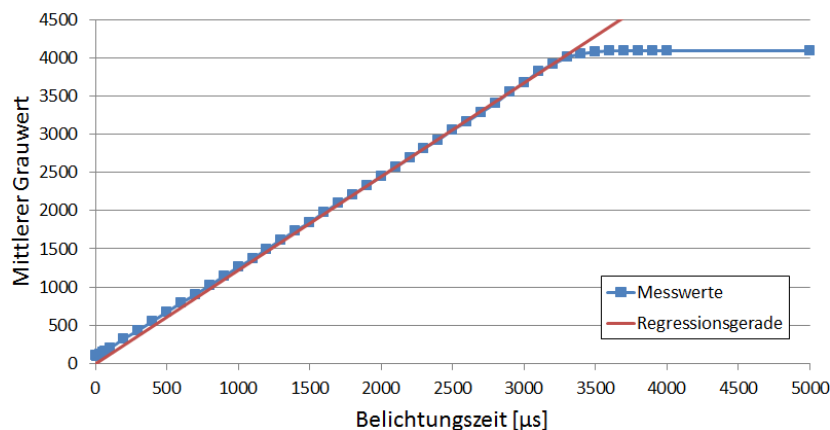


Abbildung 6.6: Linearität der Prosilica GT2000

Die Untersuchung hat eine gute Linearität im Grauwertbereich zwischen 1100 und 3300 ergeben (siehe Abb. 6.6). Dies belegt die hohe Korrelation von 99,96 % mit der die Punkte auf diesem Abschnitt auf der Regressionsgeraden liegen. Abseits dieser Grauwerte

verlassen die Punkte den linearen Verlauf, sodass die Belichtungszeit stets so eingestellt werden sollte, dass die Grauwerte diese nichtlinearen Bereiche nicht erreichen. Die genannten Grenzwerte würden den Dynamikbereich der Kamera jedoch enorm einschränken, da lediglich ein Faktor von drei zwischen diesen Grenzwerten liegt. Im Betrieb des Testreceivers wird dieser Faktor zwischen maximaler und minimaler Flussdichte erreicht, sodass der Dynamikbereich erweitert werden muss. Da in der Ausweitung der Grenzwerte nach unten hin einer geringer Fehler entsteht, wird der untere Grenzwert auf 800 gesetzt. Da von einer Helligkeitssteigerung vom Strahlenschutz auf das Target auszugehen ist, werden die Grenzwerte für den Belichtungszeitassistent auf 500 und 3000 festgesetzt. Der verursachte Fehler durch die Erweiterung des Dynamikbereichs wird im Rahmen der Genauigkeitsuntersuchung in Kapitel 7.2.1 näher untersucht. Mit einem weiteren Schalter kann eine Falschfarbendarstellung ein- und ausgeschaltet werden. In Abbildung 6.5 ist das Kamerabild mit aktivierter Falschfarbendarstellung abgebildet. Diese ermöglicht es dem Benutzer, aufgrund des höheren Kontrastes, den Fokus der Solarstrahlung deutlich zu erkennen und gegebenenfalls zu verbessern, indem die Heliostate ausgerichtet werden. In der Schwarz-Weiß-Darstellung ist der genaue Fokus häufig nicht auszumachen. Es können auch beide Assistenten gleichzeitig aktiviert sein ohne störend aufeinander einzuwirken.

6.2.3 Reiter Systemkalibration

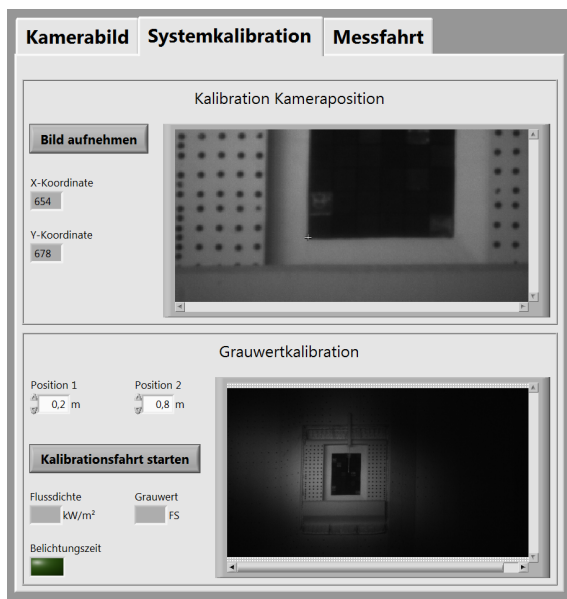


Abbildung 6.7: Kalibration der Kameraposition im Reiter “Systemkalibration“

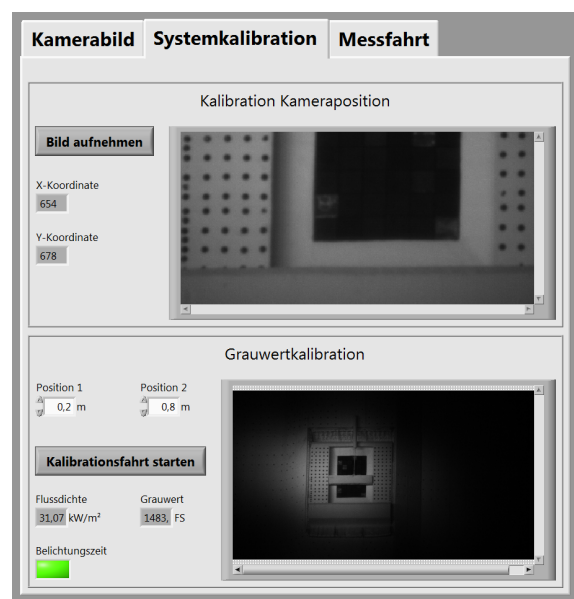


Abbildung 6.8: Grauwertkalibration im Reiter “Systemkalibration“

Der Reiter Systemkalibration ist in zwei Bereiche aufgeteilt. Im Oberen lässt sich die Kalibration der Kameraposition durchführen, während im Unteren die Grauwertkalibration gestartet werden kann.

Eine Kalibrierung der Kameraposition ist notwendig, da jede kleinste Änderung in der Kameraausrichtung aufgrund der großen Entfernung von 84 m ein Verschieben

des Testreceivers im Bild nach sich zieht. Da nun keine automatische Erkennung des Testreceivers programmiert ist, muss die Ausrichtung der Kamera über ein Kalibrationsverfahren erfasst werden, weil die genaue Position des Testreceivers im Bild für eine fehlerfreie Auswertung bekannt sein muss. Die Ausrichtung der Kamera kann durch vielerlei Einflüsse verändert werden. Folgeschwer sind Wartungsarbeiten an der Kamera selbst oder am Kameragehäuse, da ein Verlust der ursprünglichen Ausrichtung nicht zu verhindern ist. Ebenfalls beeinflusst wird die Kamera durch Arbeiten an den weiteren Geräten auf dem Kameramast. Zeitweise werden Infrarotkameras täglich auf- und wieder abgebaut. Wetterbedingte Einflüsse wie Stürme oder langanhaltender Sonnenschein können die Ausrichtung ebenfalls beeinträchtigen. Das Auftreten eines beliebigen Ereignisses wird durch die Kalibration der Kameraposition erfasst und deren negative Auswirkung beseitigt.

Durchgeführt wird die Kalibration der Kameraposition, indem ein Bild des Testreceivers aufgenommen und vergrößert im Fenster dargestellt wird (siehe Abb. 6.7). Durch einen Mausklick auf die untere linke Ecke des Testreceivers, werden die Pixelkoordinaten erfasst und gespeichert. Auf diese Weise ist die Position des Testreceivers im Bild bekannt und alle folgenden Auswertungen orientieren sich an diesen Koordinaten.

In der Grauwertkalibration wird mithilfe des Radiometers eine Zuordnung von Grauwert zu Flussdichte durchgeführt. In den beiden Eingabefeldern für die Position (siehe Abb. 6.8) können zwei Kalibrationspunkte (d.h. zwei Movingbar Positionen) eingestellt werden, die im Laufe der Kalibrationsfahrt nacheinander angefahren werden. An jeder einzelnen Position wird daraufhin ein Grau- und ein dazugehöriger Flussdichtewert des Radiometers gespeichert und in den jeweiligen Anzeigefeldern ausgegeben. Ein Kalibrationspunkt ist im Grunde ausreichend, um den linearen Zusammenhang zwischen Grauwerten und zugehöriger Flussdichte aufzustellen, da diese Gerade immer durch den Koordinatenursprung läuft. Zwischenzeitlich ist aber ein anderes Kalibrationsverfahren auf der Basis von zwei Punkten durchgeführt worden, sodass die Möglichkeit bestand eine Kalibration an zwei separaten Punkten durchzuführen. Diese wird nun genutzt, um aus den beiden Kalibrationsfaktoren einen Mittelwert zu bilden und so die Genauigkeit der Kalibration zu verbessern. Aufgrund des starken Rauschens von CMOS-Sensoren wirkt sich dies merklich auf die Genauigkeit des Messsystems aus (genauere Erklärung in Kap. 6.5.2).

Da im Laufe der Grauwertkalibration Aufnahmen vom bestrahlten Target getätigt werden wird nun im Hintergrund erneut eine Auswertung der Grauwerte im Hinblick auf die Belichtungszeit durchgeführt. Diese findet nun, entgegen der ersten Untersuchung auf den Flächen des Strahlungsschutzes, direkt auf dem Target statt, sodass mit Gewissheit eine Aussage über die korrekte Einstellung der Belichtungszeit getroffen werden kann. Hierbei wird die gesamte Breite des Targets untersucht. Befinden sich die Grauwerte nun innerhalb der Linearitätsgrenzen wird die LED "Belichtungszeit" im Bereich Grauwertkalibration auf grün, andernfalls auf rot geschaltet.

6.2.4 Reiter Messfahrt

In dem Reiter "Messfahrt" kann nach erfolgreicher Vorbereitung eine Flussdichtemessung durchgeführt werden. Hier stehen keine Einstellungsmöglichkeiten zur Verfügung,

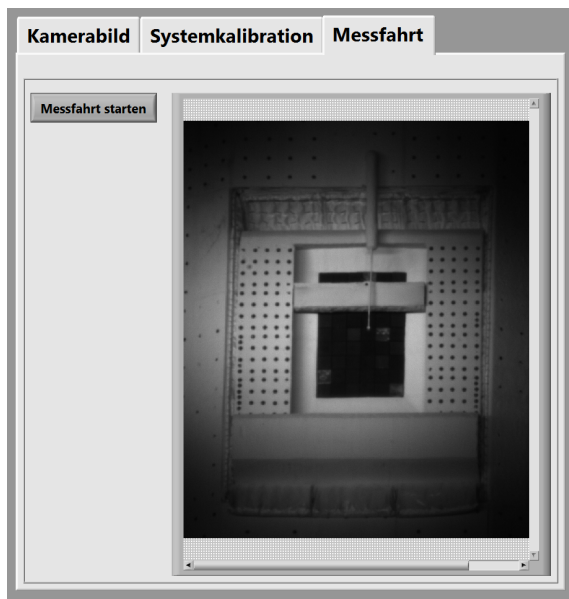


Abbildung 6.9: Durchführung einer Messfahrt im Reiter “Messfahrt“

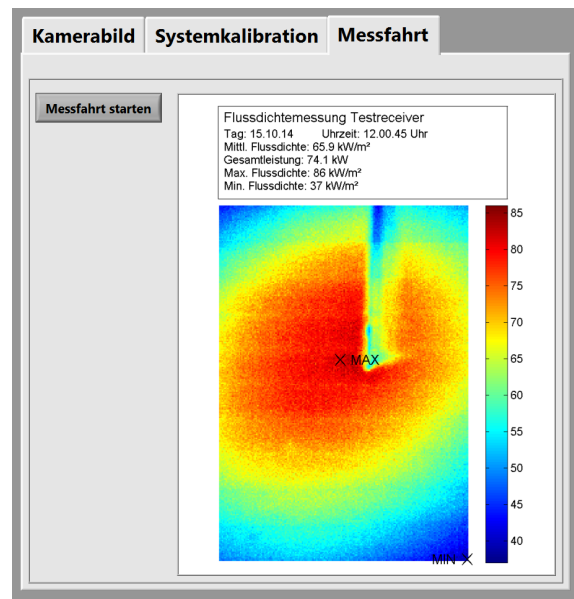


Abbildung 6.10: Darstellung der Flussdichteverteilung im Reiter “Messfahrt“

da feste Positionen angefahren werden und dies mit einer maximal möglichen Geschwindigkeit erfolgt, um die Bestrahlungsdauer zu minimieren. Nach Betätigung des Buttons “Messfahrt“ fährt die Movingbar nacheinander die festgelegten Position ab, während sie von der Kamera aufgenommen wird. Abbildung 6.9 zeigt die Movingbar an der vorletzten Aufnahme position. Nach erfolgter Messfahrt werden die Bilder ausgewertet und ein Flussdichtebild generiert, in dem die Flussdichteverteilung und die wesentlichen Daten dieser Messung abgebildet sind. Dieses Bild wird dem Benutzer daraufhin im Reiter “Messfahrt“ angezeigt (siehe Abb. 6.10).

6.3 Programmierung im Blockdiagramm

6.3.1 Programmstruktur

Die Abläufe und Funktionen, die durch das LabVIEW-Programm abgebildet werden müssen, sind sehr vielfältig. Um eine funktionsfähige und zudem robuste Ausführung dieser sehr unterschiedlich ausgeprägten Abläufe zu gewährleisten ist es wichtig eine geeignete Programmstruktur auszuwählen, bevor eine detaillierte Programmierung erfolgt. Hierfür stehen Entwurfsmuster zur Verfügung.

Bevor das ausgewählte Entwurfsmuster erläutert wird, sollen zuerst die wesentlichen Abläufe und Funktionen aufgelistet werden, da sie für die Auswahl verantwortlich sind. Ein großer Bereich der Programmierung ist die Verarbeitung der Messdaten. Die Temperaturwerte und das Radiometersignal, sowie Position und Geschwindigkeit der Movingbar müssen in diesem Bereich eingelesen, umgerechnet, visualisiert und gespeichert werden. Wesentlicher Aspekt ist hierbei die Kontinuität. Unabhängig von anderen Einstellungen oder Messabläufen muss diese Verarbeitung der Messdaten immerzu erfolgen.

Denn gerade während einer Messfahrt müssen beispielsweise die aktuellen Temperaturen weiterhin ausgelesen und dem Bediener angezeigt werden. Ein weiterer Bereich sind die Movingbarfahrten. Diese lassen sich in Einzel- und Mehrfachfahrten aufteilen. Während die Fahrten im Überwachungsfenster Einzelfahrten sind und durch einen einzigen Befehl an die Steuerung ausgeführt werden, sind Mess- und Kalibrationsfahrt hingegen Mehrfachfahrten, da im Zuge eines festgelegten Ablaufs mehrere Fahrten hintereinander durchgeführt werden. Entscheidend ist diese Aufteilung aufgrund der zeitlichen Beanspruchung. Einzelfahrten benötigen mit dem einmaligen Befehl an die SPS lediglich Bruchteile von Sekunden, während eine Kalibrations- oder Messfahrt 11 s bzw. 17 s benötigt. Eine letzte für das Entwurfsmuster entscheidende Funktion sind die vielen Schaltflächen, die auf der Bedienoberfläche zur Verfügung stehen. Ein Klick auf eine beliebige Schaltfläche muss zu jedem Zeitpunkt fehlerfrei erkannt werden und die gewünschte Funktion ausführen.

Die bestmögliche Umsetzung zur Erfassung einer Schaltflächenbetätigung ist eine Ereignisstruktur (siehe Abb. 6.11). Eine Bedienhandlung auf dem Frontpanel, wie z.B. ein Mausklick auf eine der Schaltflächen, wird hierbei als Ereignis aufgefasst und registriert. Nach Abschluss des aktuellen Schleifendurchlaufs wird das registrierte Ereignis ausgeführt. Ohne die Verwendung einer Ereignisstruktur müsste eine Buttonbetätigung in einer Schleife kontinuierlich abgefragt werden. Dies erhöht die CPU-Belastung und es besteht die Gefahr, dass eine Betätigung an einem ungünstigen Zeitpunkt nicht erkannt wird. Die Verwendung einer Ereignisstruktur verringert hingegen die CPU-Belastung und stellt sicher, dass Betätigungen registriert und ausgeführt werden. Zudem wird das Blockdiagramm vereinfacht und somit übersichtlicher. Mit einer Ereignisstruktur lassen sich beliebig viele Ereignisse auf dem Frontpanel überwachen. Jedem einzelnen Button wird hierbei ein eigener Reiter (Case) zugeordnet, in dem das auszuführende Programm eingesetzt wird. Nach Betätigung eines Buttons wird der Programmcode im zugehörigen Case einmal ausgeführt und das Ereignis wieder geschlossen. Zusätzlich besitzt jede zeitlich begrenzte Ereignisstruktur ein Timeout-Case. Wird in einer vorgegebenen Zeit, in unserem Beispielprogramm auf 50 ms gesetzt, kein Ereignis registriert, wird das Timeout-Case ausgeführt. Hier können Programmabschnitte untergebracht werden, die unabhängig von Ereignissen dauerhaft ausgeführt werden sollen. Die Verarbeitung der Messdaten kann demnach im Timeout-Case untergebracht werden, während alle Buttonbetätigungen in den einzelnen Reitern ausgeführt werden. Problematisch ist jedoch

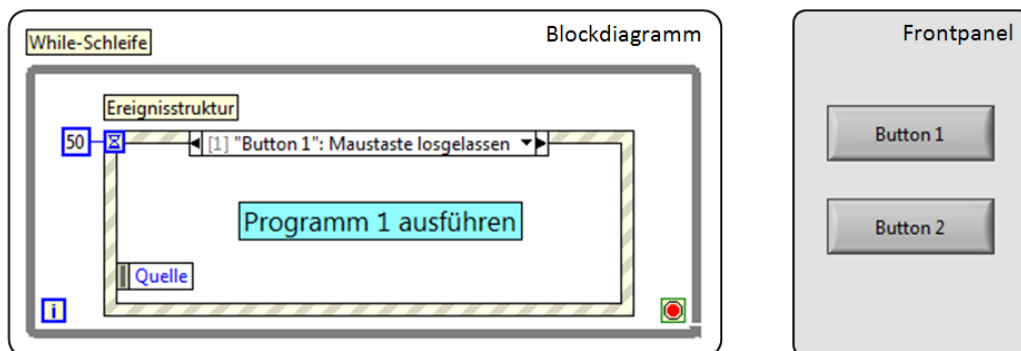


Abbildung 6.11: Aufbau zur Erfassung einer Buttonbetätigung mit Ereignisstruktur

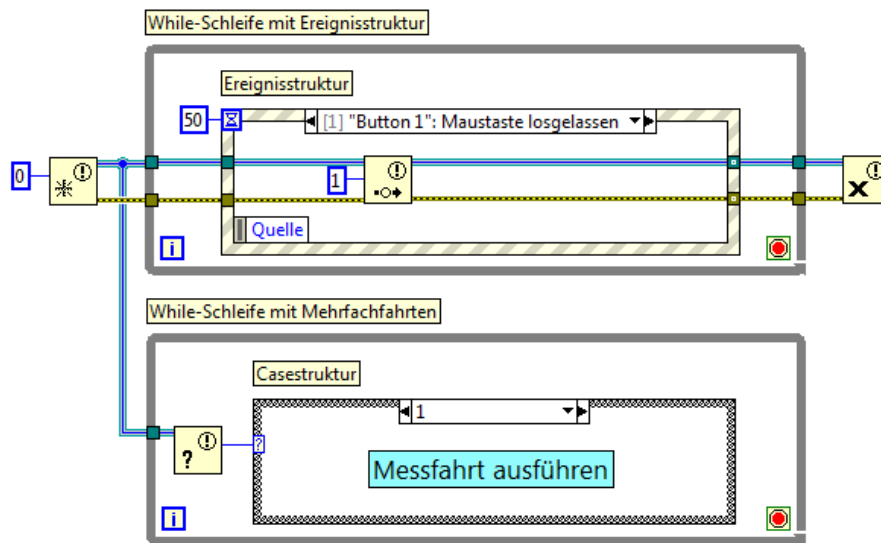


Abbildung 6.12: Entwurfsmuster einer parallelen Schleifenstruktur mit Synchronisation

die Ausführung von Mess- oder Kalibrationsfahrten, da diese einen längeren Zeitraum beanspruchen. Befindet sich die Ereignisstruktur über einen Zeitraum von mehreren Sekunden in einem Ereigniscase wird das Timeout-Case nicht mehr ausgeführt und somit die Verarbeitung der Messdaten unterbrochen.

Dieses Problem kann mit einem geeigneten Entwurfsmuster aufgehoben werden. Ausgewählt wird eine Struktur mit zwei parallelen Schleifen. In der einen ist die Ereignisstruktur untergebracht, während in der anderen die Mehrfachfahrten für Kalibration und Messung enthalten sind. Über eine Schleifensynchronisation mit sogenannten Meldern wird nun eine Kommunikation zwischen beiden Schleifen ermöglicht. Wird nun der Button "Messfahrt starten" betätigt, wird innerhalb des entsprechenden Ereignisses ein Kommando an die zweite Schleife übergeben, um die Messfahrt zu starten. Während nun die erste Schleife wieder zurück in das Timeout-Case fällt und die Verarbeitung der Messdaten fortsetzt, wird in der zweiten Schleife parallel dazu die Messfahrt ausgeführt. In Abbildung 6.12 ist das Entwurfsmuster einer parallelen Schleifenstruktur mit einem Synchronisationsverfahren über Melder dargestellt. Wird "Button 1" zum Starten der Messfahrt betätigt, wird im entsprechenden Ereigniscase lediglich eine "1" in einen Melder geschrieben und die Bearbeitung abgeschlossen. In der zweiten Schleife wird die "1" durch den Melder übergeben, woraufhin der Reiter "1" einer Casestruktur ausgeführt wird, in dem der Programmcode für die Messfahrt enthalten ist.

Das Entwurfsmuster aus zwei parallelen Schleifen mit einer Ereignisstruktur in der ersten Schleife ermöglicht eine Verarbeitung der Messdaten parallel zu Movingbarfahrten und ein sicheres Erkennen von Buttonbetätigungen. Der genaue Programmcode im Blockdiagramm kann im Anhang von Abbildung A.1 bis A.28 eingesehen werden.

In einem ersten Ansatz ist auf ein geeignetes Entwurfsmuster verzichtet worden. Das gesamte Programm wurde in einer Schleife und zudem ohne Ereignisstruktur programmiert. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Programmteilen ist hierbei mit sogenannten "lokalen Variablen" umgesetzt worden. Bei diesen Variablen findet keine Synchronisation zwischen einem Beschreiben an der einen und einem Auslesen an einer anderen Stelle statt. Hierdurch kam es zu Kommunikationsproblemen, welche auch Pro-

grammabbrüche zur Folge hatten. Nachdem das Problem in der zunächst entworfenen Programmstruktur gefunden war, ist das System erneut in der beschriebenen Struktur programmiert worden.

6.3.2 Programmablauf

In diesem Abschnitt wird der grundlegende Programmablauf dargestellt. Nacheinander werden hierbei die beiden Schleifen der parallelen Struktur erläutert.

Wie bereits erwähnt enthält die erste Schleife im Wesentlichen eine Ereignisstruktur. In Abbildung 6.13 sind die einzelnen Reiter dieser Ereignisstruktur aufgeführt. Bevor das Programm nach dem Start durch den Bediener jedoch mit der Bearbeitung der Ereignisstruktur beginnt, wird eine Systemvorbereitung durchlaufen. Hierbei werden die Melder für die Schleifenkommunikation initialisiert, sowie eine Verbindung zu den Hardwarekomponenten Kamera und e.bloxx aufgebaut. Anschließend wird eine Ordnerstruktur erstellt, um Messdaten, Kalibrierdaten und Flussdichtemessungen übersichtlich abzulegen. Zuletzt werden die Kalibrierdaten der letzten Kamera- und Grauwertkalibration geladen. Kommt es zu einem Systemabsturz oder muss das Messsystem aus anderen Gründen kurzzeitig ausgeschaltet werden, kann somit nach einem erneuten Systemstart unverzüglich gemessen werden ohne vorher Kalibrierungen durchführen zu müssen.

Nach erfolgreicher Systemvorbereitung kommt die Ereignisstruktur zum Einsatz. Die kreisförmige Darstellung soll ein dauerhaft wiederholtes Ausführen der Ereignisstruktur hervorheben. Anzumerken ist jedoch, dass jeweils nur einer der sieben aufgeführten Fälle bearbeitet wird. Geht eine Aktion vom Systembediener aus, beispielsweise ein Mausklick auf die Schaltfläche "Parkposition", so werden die Reiter Timeout und Einzelfahrt übersprungen und der Programmcode zum Anfahren der Parkposition ausgeführt. Nach erfolgreicher Bearbeitung werden alle nachfolgenden Reiter ebenfalls übersprungen und die Ereignisstruktur wird aufs Neue ausgeführt. Geht nun innerhalb der erwähnten 50 ms keine Aktion vom Bediener aus, wird das Timeout-Case ausgeführt, in dem die Verarbeitung der Messdaten untergebracht ist. Nach dem einmaligen Durchlauf der Messdatenverarbeitung werden alle nachstehenden Reiter übersprungen und die Ereignisstruktur wiederholt neu gestartet. Da eine Buttonbetätigung relativ selten erfolgt, ist eine dauerhafte Verarbeitung der Messdaten gewährleistet. Die Ereignisstruktur wird mit einer Frequenz von 14 Hz ausgeführt, während eine Buttonbetätigung in Ausnahmesituationen jede Sekunde erfolgt.

Alle aufgeführten Ereignisse werden direkt im entsprechenden Case ausgeführt, bis auf die Kalibrations- und Messfahrt. Hier wird eine Meldung an die parallel laufende Schleife übergeben, welche den entsprechenden Code ausführt. Der Ablauf dieser Fahrten wird im Ablaufplan der zweiten Schleife beschrieben.

Wird das Messsystem über die Bedienoberfläche beendet, kommt es zu einer Nachbereitung, bevor das System gänzlich ausgeschaltet wird. Hierbei wird die Kommunikationen zu Kamera und e.bloxx beendet und die Melder geschlossen, um den Speicherbereich im Arbeitsspeicher wieder freizugeben. Anschließend werden die aktuellen Kalibrierdaten gespeichert. Zuletzt wird ein Fahrbefehl an die SPS weitergegeben, um die Movingbar in die Parkposition zu fahren.



Abbildung 6.13: Programmablauf von Schleife 1

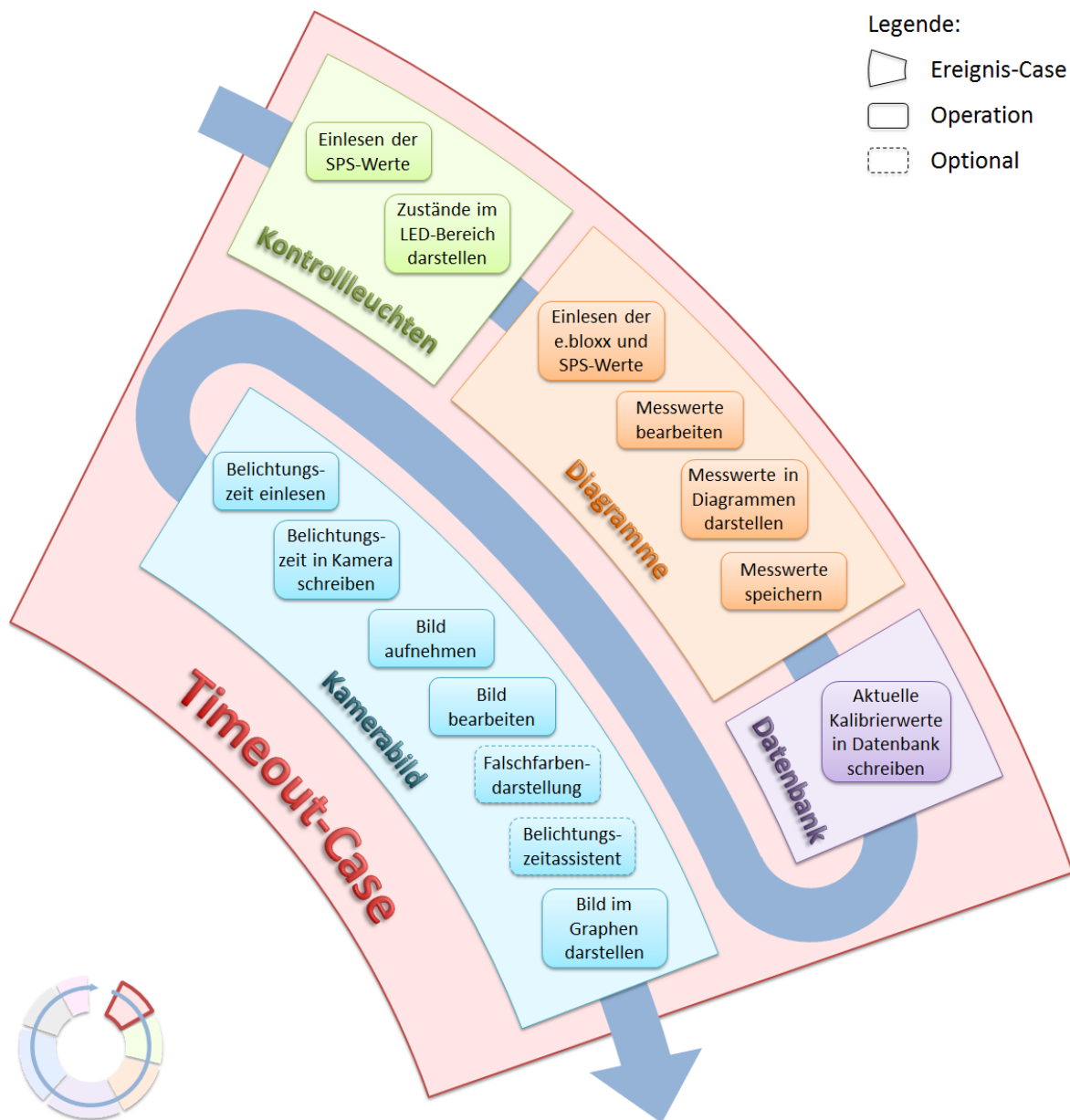


Abbildung 6.14: Programmablauf des Timeout-Case

Der Programmablauf im Timeout-Case soll gesondert beschrieben werden, da in ihm die komplette Systemüberwachung untergebracht ist. Neben der Aktualisierung von Kontrollleuchten, Diagrammen und Datenbank wird hier auch das Kamerabild erzeugt (siehe Abb.6.14). Die Aktualisierung der Kontrollleuchten erfolgt in zwei Schritten. Im Ersten werden die Zustände aller im LED-Bereich enthaltenen Variablen aus der SPS eingelesen und im Zweiten werden diese aktuellen Werte an die LED's weitergegeben. Enthalten sind wichtige Informationen aus dem Schaltschrank, wie der Schaltzustand der Motorsteuerung. Ebenso wird dem Bediener mitgeteilt, ob die Automatik aktiviert ist, die einen Zugriff vom Messrechner auf die Fahrbefehle der SPS ermöglicht. Mit der LED "Durchflusswächter" wird dem Bediener der Schaltzustand eines Durchflusswächters in der Wasserleitung des Radiometers übermittelt. Dieser ist aktiv sobald die

Kühlung eingeschaltet ist und darf im Laufe von Messaktivitäten zu keinen Zeitpunkt ausfallen.

Eine weiterer Bereich im Timeout-Case ist die Aktualisierung der Diagramme bzw. die Verarbeitung der Messwerte. Hierfür werden die e.bloxx mit der aktuellen Flussdichte und den aktuellen Temperaturen ausgelesen, sowie Position und Geschwindigkeit der Movingbar aus der SPS entnommen. Anschließend werden die Messwerte bearbeitet. Die vom Radiometer gemessene Flussdichte wird mittels Messumformer als Einheits-signal zwischen 4 mA und 20 mA gemessen und muss demnach in ein Flussdichtewert umgerechnet werden. Da das Radiometer jedoch ein Spannungssignal von 0 mV - 10 mV ausgibt und die Kalibrierung mit diesem Signal durchgeführt worden ist, wird vorerst das Stromsignal I_r [mA] mit

$$U_r = \frac{5 \text{ mV}}{8 \text{ mA}} \cdot I_r - \frac{5}{2} \text{ mV} \quad (6.1)$$

wieder in ein Spannungssignal U_r [mV] zurück gerechnet. Im Sonnenofen des DLR, einer Anlage, die konzentrierte Solarstrahlung bereit stellt, ergab eine Kalibration des Radiometers eine Empfindlichkeit von 96,07 kW/m²/mV, sodass die Flussdichte des Radiometers D_r [kW/m²] mit

$$D_r = U_r \cdot 96,07 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{mV}} = 60,04 \frac{\text{kW}}{\text{mA} \cdot \text{m}^2} \cdot I_r - 240,18 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (6.2)$$

aus dem Stromsignal berechnet wird. Position und Geschwindigkeit werden in 0,1 μm und 10 μm/s angegeben und in SI-Einheiten umgerechnet. Nach Bearbeitung der Messwerte werden diese in den entsprechenden Diagrammen dargestellt und anschließend gespeichert.

Im nächsten Bereich wird die Datenbank mit den neusten Kalibrierdaten aktualisiert. Wichtig wird dieser Schritt lediglich nach erfolgten Kalibrationen, da zu keinem anderen Zeitpunkt neue Werte erzeugt werden. Nach einer Kalibration der Kameraposition werden die ermittelten Koordinaten abgelegt, während nach einer Kalibrationsfahrt zur Kalibrierung des Grauwerts Flussdichte und Grauwert der beiden angefahrenen Punkte in die Datenbank geschrieben werden.

Im letzten Bereich des Timeout-Case wird die Aufnahme im Reiter “Kamerabild“ erzeugt. Im ersten Schritt wird hier die Belichtungszeit aus dem Eingabefenster der Oberfläche eingelesen und in die Kamera geschrieben. Anschließend wird ein Bild aufgenommen und bearbeitet. Im Zuge der Bearbeitung wird das Bild auf die Ansicht des Testreceivers zugeschnitten. Große Bildbereiche des Strahlenschutzes werden somit entfernt. Zudem wird das Bild vergrößert, um den gesamten Bildbereich des Graphen auszufüllen, sodass sich eine große Ansicht des Testreceivers ergibt. Bevor das Bild im Graphen dargestellt wird, kann durch den Bediener zusätzlich die Falschfarbendarstellung oder der Belichtungszeitassistent aktiviert werden, was zusätzliche Bildbearbeitungen nach sich zieht.

Der Programmablauf der parallel laufenden Schleife ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Im Wesentlichen werden hier die Mehrfachfahrten Kalibrations- und Messfahrt durchgeführt. Innerhalb der Schleife ist eine Casestruktur mit drei unterschiedlichen Fällen aufgebaut. Welcher dieser Fälle in jedem einzelnen Schleifendurchlauf ausgeführt wird,

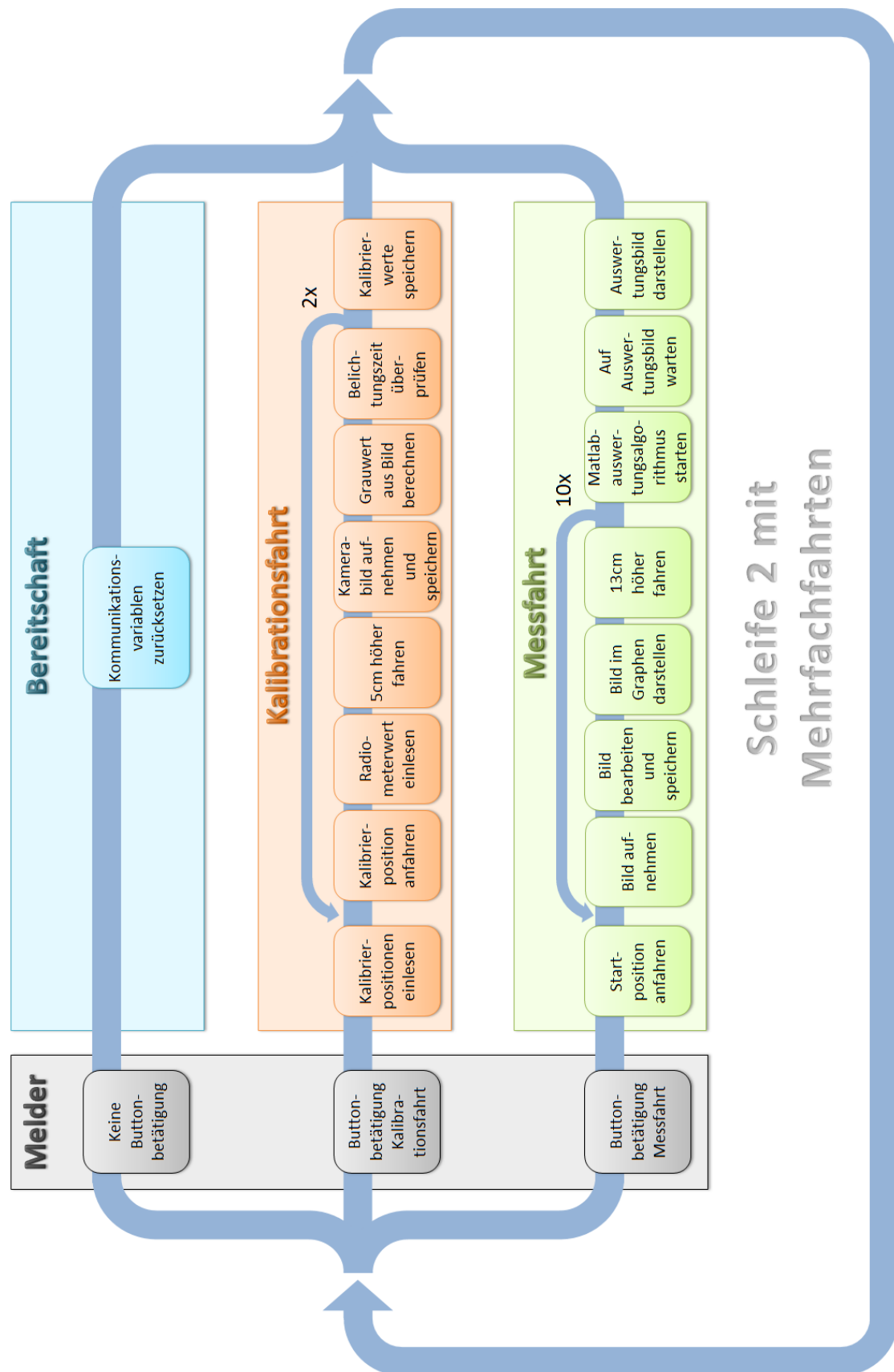


Abbildung 6.15: Programmablauf von Schleife 2

entscheidet ein Melder. Dieser ist mit der ersten Schleife synchronisiert und enthält Informationen zu den Schaltflächen “Kalibrationsfahrt starten“ und “Messfahrt starten“. Wird keine der beiden Schaltflächen betätigt wird Fall 1 ausgeführt, in welcher die Schleife lediglich die Kommunikationsvariablen zwischen beiden Schleifen zurücksetzt und die Ausführung beendet. Auf diese Weise wird die Casestruktur erneut ausgeführt und der Melder abgefragt, sodass die zweite Schleife in Bereitschaft bleibt, um auf eine Buttonbetätigung unverzüglich zu reagieren. Wird nun eine der beiden genannten Schaltflächen angeklickt, durchläuft die Casestruktur den entsprechenden Fall und führt die Fahrt aus.

Eine Kalibrationsfahrt beginnt mit dem Einlesen der beiden Eingabefelder für die Kalibrierpositionen. Diese sind auf 0,2m und 0,8m voreingestellt. Dies entspricht einem Punkt am unteren Rand des Testreceivers und einem mittigen Punkt. Anschließend wird der erste Punkt angefahren. Nach einer kurzen Wartezeit, um einen stationären Wert des Radiometer zu erreichen, wird der Radiometerwert eingelesen. Um den Rauschfehler zu minimieren wird hierbei ein Mittelwert aus 15 Messwerten gebildet. Anschließend verfährt die Movingbar auf eine Position, welche sich 5 cm über der ersten Kalibrierposition befindet. Dies ist erforderlich, da das Radiometer über dem Target angebracht ist, Grau- und Flussdichtewert aber von exakt der gleichen Position in der Strahlung aufgenommen werden müssen. Die Movingbar fährt nun 5 cm in die Höhe, damit sich das Target nun an der Stelle befindet, an dem zuvor das Radiometer positioniert war. An dieser Position wird ein Aufnahme getätigt und abgespeichert. Aus einem quadratischen Pixelbereich mit den Abmessungen 3x3 Pixel bzw. 15x15 mm wird nun ein mittlerer Grauwert berechnet. An dieser Stelle wird erneut ein Test der Helligkeitsverteilung auf dem Target durchgeführt, um dem Bediener eine Rückmeldung bezüglich der Belichtungszeiteinstellung zu geben. Hierbei werden Grauwerte im Bereich von 800 bis 330 zugelassen. Dies verhindert unbrauchbare Messungen aufgrund falsch gewählter Belichtungszeit. Nachdem die Kalibrationsroutine für einen Punkt durchgelaufen ist, wird der Vorgang für den zweiten Punkt wiederholt. Die beiden ermittelten Grau- und Flussdichtewerten werden nach Abschluss der Kalibrationsfahrt abgespeichert.

Für die Durchführung der Messfahrt stehen dem Bediener keine Eingaben zur Verfügung. Nach Betätigung der Schaltfläche “Messfahrt starten“ wird somit unverzüglich die Startposition angefahren. Daraufhin durchläuft die Movingbar einen sich wiederholenden Prozess, in dem ein Bild aufgenommen, bearbeitet, dargestellt und abgespeichert wird. Anschließend fährt die Movingbar 13 cm höher und wiederholt den Vorgang. Dem Benutzer wird im Sekundentakt jedes Bild aus den einzelnen Position angezeigt, sodass der Verlauf der Messfahrt auch visuell verfolgt werden kann. Nach 10 getätigten Aufnahmen fährt die Movingbar in die Parkposition zurück und startet über einen Kommandozeilenbefehl die Ausführung eines Matlabalgorithmus zur Auswertung der Bilder (genauere Erklärung folgt in Kap. 6.4). Nachdem dieser Algorithmus aus den Einzelaufnahmen ein Flussdichtebild zusammengesetzt und dieses abgespeichert hat, wird es im Graphen für die Messfahrttaufnahmen angezeigt.

6.3.3 Umgesetzte Sicherheitsvorrichtungen

Aufgrund des hohen Gefahren- und Schadenpotentials von konzentrierter Solarstrahlung sind Sicherheitsvorrichtungen von hoher Bedeutung. Aus diesem Grund müssen Vorrichtungen in die Programmierung integriert werden, um Störfälle zu reduzieren oder zumindest eine Beschädigung der Messeinrichtung zu verhindern. Die bereits umgesetzten Sicherheitsvorrichtungen sind folgend aufgelistet und erläutert, jedoch sollten weitere hinzugefügt werden.

Begrenzte Eingabemöglichkeiten

Um den Bediener vor einer Fehlbedienung zu schützen sind die Eingabemöglichkeiten stark eingeschränkt. Variable Größen, wie die Verfahrgeschwindigkeiten in Kalibrations- und Messfahrt, der Abstand zwischen den Positionen der Messfahrt, die Kommunikationsparameter zwischen Messrechner und Kamera und weitere Parameter werden nicht zur Einstellung durch den Bediener zur Verfügung gestellt. Obwohl diese von geschulten Nutzern verwendet werden können, um Fahrten hinsichtlich Bestrahlungsstärke und Genauigkeit anzupassen, bieten sie ungeschulten Bedienern hingegen die Möglichkeit eine Störung zu produzieren. Da die Sicherheit in diesem Fall Vorrang hat, wird auf die Bereitstellung dieser Variablen verzichtet, sodass lediglich fünf Eingabefelder und sechs Schaltflächen vorzufinden sind.

Die begrenzten Eingabemöglichkeiten betreffen allerdings auch die verfügbaren Eingabefelder. Um beispielsweise zu verhindern, dass die Movingbar bis in die oberen oder unteren Endschanter gefahren wird, ist die Eingabe auf Zahlen zwischen 0 m und 1,6 m begrenzt. Dies gilt für beide Positionseingabefelder. Eine Fahrt in die Endschanter würde ein Ausfallen der Steuerbarkeit nach sich ziehen, welche erst durch ein mechanisches Lösen und Verschieben dieser Schalter aufgehoben werden kann. Passiert dies im bestrahlten Zustand können Schäden durch ein Überschreiten der Grenztemperaturen entstehen. Ebenso wie die Position ist auch die Geschwindigkeit in ihrer Eingabe begrenzt. Hier können Werte bis maximal 0,65 m/s eingegeben werden.

Priorität der Parkposition

Von den vier zur Verfügung stehen Fahrten erhält die Parkposition die höchste Priorität. Wird die Schaltfläche zum Anfahren der Parkposition betätigt wird jede der übrigen Fahrten abgebrochen und die Movingbar fährt unverzüglich in die Parkposition zurück. Realisiert wird dies, indem in den Melder für die Kommunikation mit der zweiten Schleife eine "0" geschrieben wird (siehe Abb. 6.16). Dies führt dazu, dass die zweite Schleife den Fall "Bereitschaft" ausführt und somit die anderen Fahrten, sofern diese gerade ausgeführt werden, unterbricht. Sollten im Zuge der Mehrfachfahrten Unregelmäßigkeiten auf der Targetoberfläche zu beobachten sein oder anderweitige Störungen auftreten, kann somit unverzüglich reagiert werden.

Parkpositionsfahrt in Systemnachbereitung

Zusätzlich zu der hohen Priorität ist die Parkpositionsfahrt in die Systemnachbereitung integriert worden. Dies hat zur Folge, dass sowohl durch eine Betätigung des "Stopp" Buttons, mit dem die Steuerung des Messsystem abgeschaltet wird, als auch bei auftretender Fehlern, die ein Beenden des Programms zur Folge haben, die Parkposition

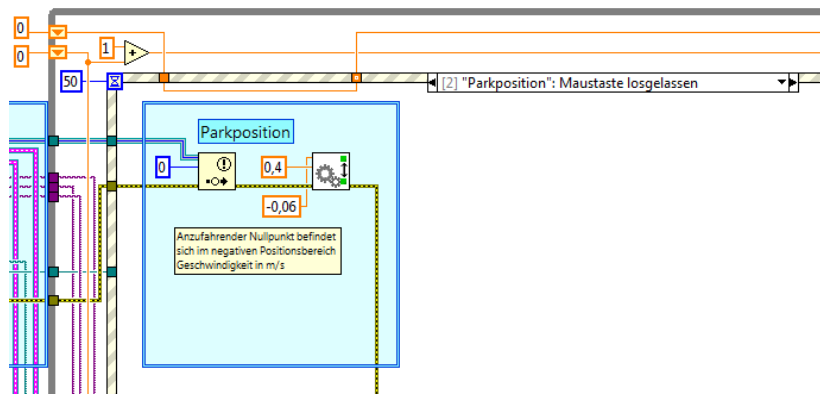


Abbildung 6.16: Blockdiagrammausschnitt: Ereigniscase Parkposition

angefahren wird. In der Kommunikation zwischen Messrechner und den angeschlossenen Komponenten Kamera, SPS und e.bloxx kann es ebenso zu Fehlern kommen, wie durch das Ausführen des Matlabalgorithmus. Vorfälle haben gezeigt, dass Nutzer Ordernamen in der Programmstruktur geändert haben, sodass es im Zuge einer Messfahrt zu einem Systemabbruch kam. Dies zeigt, dass Fehlbedienungen nicht gänzlich auszuschließen sind, weshalb Sicherheitsvorrichtungen wie diese an Bedeutung gewinnen. Umgesetzt ist diese Sicherheitsvorrichtung, indem die Fahrt in die Parkposition an das Ende des sogenannten Fehler-Clusters gesetzt wird. Der Fehler-Cluster wird durch die gelben Linien dargestellt, an dessen Ende in Schleife 1 (siehe Abb. 6.18) und Schleife 2 (siehe Abb. 6.17) die Parkpositionsfahrt steht. Kommt es an irgendeiner Position in einer der Schleifen zu einem Fehler, wird dieser durch den Fehler-Cluster bis an das Ende durchgereicht und löst letztendlich die Fahrt aus.

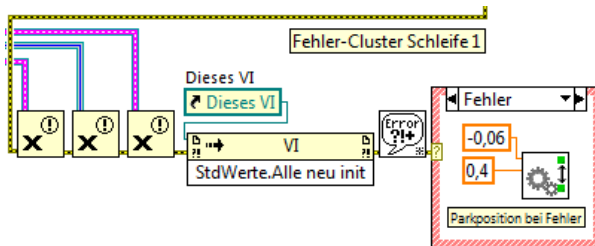


Abbildung 6.17: Blockdiagrammausschnitt: Ende des Fehler-Clusters in Schleife 1

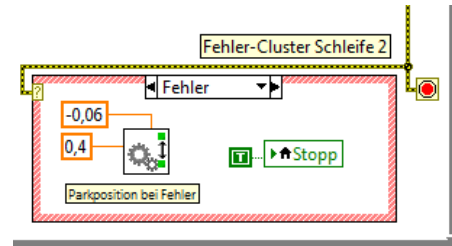


Abbildung 6.18: Blockdiagrammausschnitt: Ende des Fehler-Clusters in Schleife 2

6.4 Auswertungsalgorithmus in Matlab

Wie bereits erwähnt wird die Auswertung der im Laufe der Messfahrt aufgenommenen Bilder nicht in LabVIEW selbst vorgenommen, sondern eine externe Matlabroutine verwendet. Dies liegt in erster Linie an den Vorteilen, die Matlab in der Bildverarbeitung gegenüber LabVIEW aufweist. Die Auswertung ist somit ganzheitlich ausgekoppelt und

kann zudem beliebig ausgeweitet werden, ohne in die grundlegenden Bewegungsabläufe des Messsystem eingreifen zu müssen. Wird das Messsystem in Zukunft auch in weiteren Experimenten eingesetzt, welche beispielsweise eine detaillierte Auswertung einzelner Bereiche erfordert, kann dies problemlos in dem Matlabalgorithmus angepasst werden. Der Code wird hierbei in Matlab programmiert, getestet und anschließend mithilfe des Matlab-Compilers in eine eigenständige Anwendung umgewandelt. Hierdurch lässt sich der Algorithmus auf dem Messrechner ohne eine vorhandene Matlab Lizenz ausführen. Lediglich die Matlab Compiler Runtime muss hierfür auf dem Messrechner installiert werden, die einen eigenständigen Satz von dynamischen Bibliotheken enthält, mit denen kompilierte Matlab-Anwendungen ausgeführt werden können.

Gestartet wird die Anwendung unmittelbar nachdem die Movingbar die höchste Position der Messfahrt erreicht hat und den Befehl zur Parkpositionsfahrt erhalten hat (siehe Abb. 6.19). Dies geschieht über einen Kommandozeilenbefehl, indem im Hintergrund ein Kommandofenster geöffnet und in dieses der Pfad eingetragen wird, an dem die Anwendung abgelegt ist.

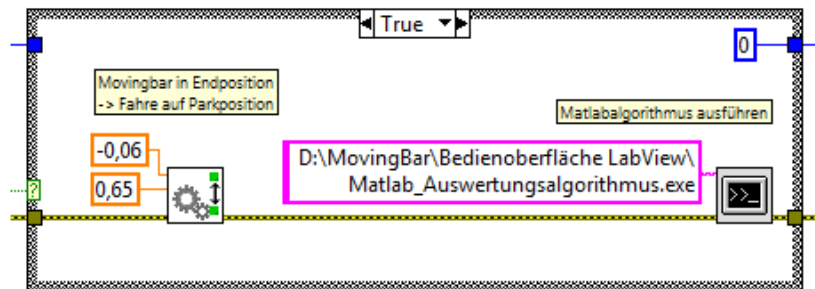


Abbildung 6.19: Blockdiagrammausschnitt: Start des Matlab-Auswertungsalgorithmus

6.4.1 Programmablaufplan

Der Ablauf einer kompletten Auswertung ist in Abbildung 6.20 aufgezeigt. Zu Anfang wird die zuletzt getätigte Kalibration und Messung gesucht, um vorerst die Kalibrierdaten zu laden. Aus den Grau- und Flussdichtewerten der beiden Kalibrationspunkte wird daraufhin wie folgt ein Kalibrierfaktor k [kW/m²/GW] berechnet:

$$k = \frac{\frac{D_1}{g_1} + \frac{D_2}{g_2}}{2} \quad (6.3)$$

Anschließend werden die Koordinaten der Kamerakalibration eingelesen, um die genaue Position des Testreceivers im Bild zu erhalten und an der richtigen Position mit den Ausschnitten zu beginnen. Daraufhin wird eine Schleife gestartet, die nacheinander die 10 Aufnahmen lädt, den Ausschnitt des Targets vornimmt und diesen zu einem Gesamtbild hinzufügt. Nach ausgeführter Schleife liegt ein Graustufenbild vor, welches exakt den Abmessungen des Testreceivers entspricht. Hierauf wird nun der zuvor berechnete Kalibrierfaktor angewendet, sodass eine Flussdichteverteilung über den gesamten

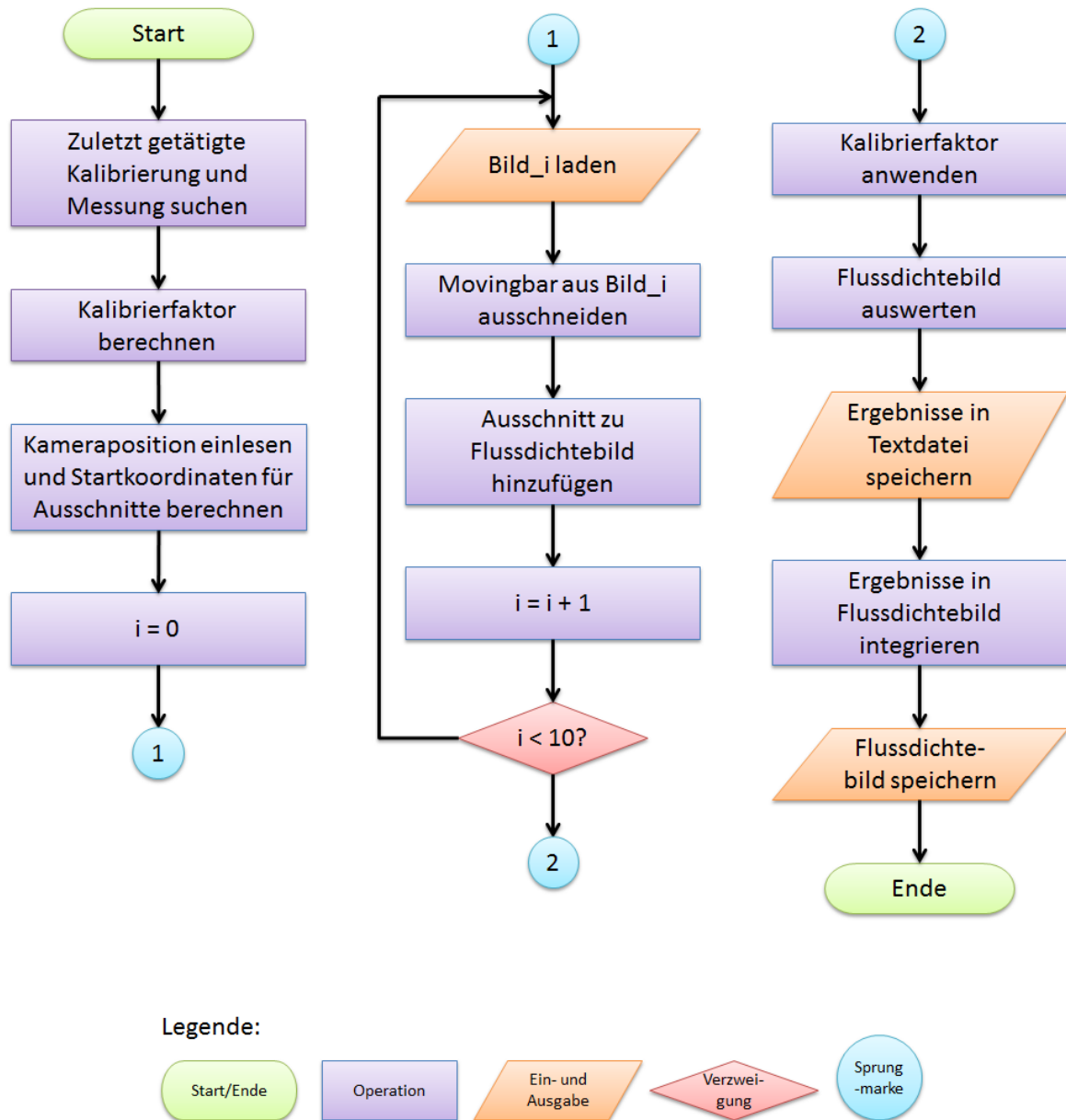


Abbildung 6.20: Programmablaufplan der Matlabroutine

Receiver entsteht. Im Folgenden wird die Flussdichteverteilung ausgewertet, um dem Bediener neben dem visuellen Ergebnis weitere Informationen zu liefern. Hierzu gehört die mittlere Strahlungsflussdichte, die Strahlungsleistung auf dem gesamten Receiver, sowie die Punkte maximaler und minimaler Bestrahlungsstärke im Flussdichtebild. Die mittlere Flussdichte D_M wird mit

$$D_m = \frac{\sum_{1 \leq i \leq i_{max}} \sum_{1 \leq j \leq j_{max}} D(i, j)}{i_{max} \cdot j_{max}} \quad (6.4)$$

berechnet. Hieraus lässt sich mit der Höhe h_r und der Breite b_r des Testreceivers die Gesamtleistung D_{ges} [kW] berechnen:

$$D_{ges} = D_m \cdot h_r \cdot b_r \quad (6.5)$$

Für die Suche des maximalen und minimalen Flussdichtewertes werden Matlab-Funktionen verwendet.

Nach erfolgter Bildauswertung werden die Ergebnisse zum einen in einer Textdatei zusammengefasst und abgespeichert und zum anderen in das Flussdichtebild integriert, welches daraufhin ebenfalls abgespeichert wird.

6.5 Fehlerkorrekturen

6.5.1 Ungenauigkeit der lokalen Flussdichtemessung

Im Zuge erster Betriebstage ist eine Streuung der Flussdichtemessung aufgefallen. Die blaue Kurve in Abbildung 6.21 zeigt den Verlauf der Flussdichte über 3 s hinweg. In diesem Zeitraum ist eine Streuung der Flussdichte zwischen $53,55 \text{ kW/m}^2$ und $54,4 \text{ kW/m}^2$ zu beobachten. Bei einem Mittelwert von $53,95$ (bei $53,5 \text{ s}$) entsteht eine Streuung von ca. $\pm 1 \%$. Um diesen durch die Verarbeitung des Messsignals bedingten statistischen Fehler zu eliminieren ist ein gleitender Mittelwert über die Flussdichtemessung gelegt worden, welcher die letzten 15 Messwerte zur Berechnung nutzt. Die rote Kurve stellte diesen gleitenden Mittelwert dar. Stichproben bei Strahlungsflussdichten von über 200 kW/m^2 haben einen Fehler in der gleichen Größenordnung ergeben.

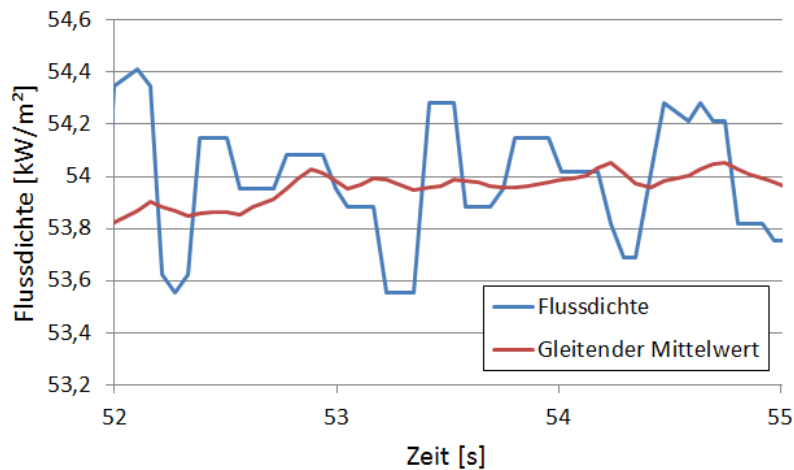


Abbildung 6.21: Ungenauigkeit in der Flussdichtemessung

6.5.2 Dunkelstrom

Als Dunkelstrom wird derjenige Anteil eines Pixelsignals verstanden, der nicht durch einfallendes Licht, sondern durch die thermische Energie der Elektronen erzeugt wird.

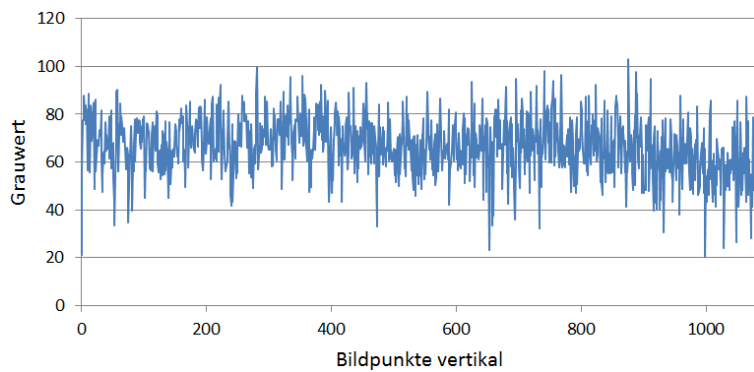


Abbildung 6.22: Grauwerte auf einer vertikal verlaufenden Linie aus einer Messung mit verschlossenem Objektiv

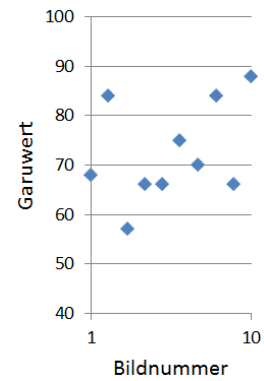


Abbildung 6.23: Grauwert eines Pixels in 10 aufeinanderfolgenden Aufnahmen

Zu dem Signal, welches durch eintreffende Photonen entsteht, addiert sich demnach noch das Dunkelstromsignal, welches von der Temperatur des CMOS-Chips abhängig ist. Die Höhe dieses Signals wird ermittelt, indem Aufnahmen mit verschlossenem Objektiv getätigt werden. Die ohne Lichteinfall generierte Ladung in jedem Pixel würde nun einen Messfehler erzeugen, da sie die durch den photoelektrischen Effekt erzeugte Ladung fälschlicherweise erhöht.

Korrigiert werden kann dieser Fehlereinfluss, indem das Dunkelstromsignal vom Nutzsignal subtrahiert wird. Jedoch unterliegt dieses Signal einem starken Rauschen, was die Korrektur erschwert. In Abbildung 6.22 sind die Grauwerte entlang einer vertikalen Linie aufgetragen, die einer Aufnahme mit verschlossenem Objektiv entnommen sind. Die Grauwerte unterliegen einem starken Rauschen zwischen 20 und 103. Verursacht wird dies allerdings nicht durch Inhomogenitäten bei der Chipherstellung, was einen nahezu konstanten Dunkelstrom je Pixel zur Folge hätte, wie es bei einem CCD-Chip der Fall ist, sondern vielmehr durch den Aufbau des CMOS-Chips selbst. Hierdurch kommt es zu Tunneleffekten und Stoßionisationen, die sehr dynamisch sind [32]. In Abbildung 6.23 ist die Dynamik dieses Rauschens aufgezeigt. Dargestellt ist der Grauwert eines einzelnen Pixels aus zehn aufeinanderfolgenden Aufnahmen mit einem Rauschen zwischen 57 und 88.

Da keine pixelspezifische Dunkelstromkompensation möglich ist, besteht die bestmögliche Korrektur in einem Dunkelstrommittelwert, der von jedem einzelnen Pixel subtrahiert wird. Bei der Berechnung reicht es jedoch nicht aus den Mittelwert aus einer einzigen Aufnahme zu berechnen, da selbst diese Mittelwerte einer Streuung mit einer Standardabweichung von $\sigma_d = \pm 3\%$ unterliegen. Aus einer Vielzahl von aufgenommen

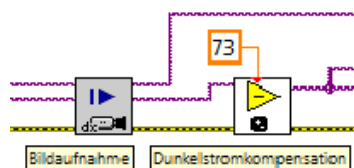


Abbildung 6.24: Dunkelstromkompensation im LabVIEW Blockdiagramm

Bildern wurde deshalb der Mittelwert zur Korrektur berechnet. Ergebnis ist eine Dunkelstromkorrektur von 73.

Nach jeder im Kalibrations- und Messablauf getätigten Aufnahme wird dieser Korrekturwert von jedem einzelnen Pixel subtrahiert 6.24.

6.5.3 Grauwertstreuung in der Grauwertkalibration

Die beschriebene Streuung des Grauwerts erschwert nicht nur die Dunkelstromkompensation, sie beeinflusst ebenso die Grauwertkalibration. Da im Zuge der Kalibrationsfahrt ein Flussdichtewert mit einem Grauwert gleichgesetzt wird, der einem kleinen Bildbereich entnommen wird, wirkt sich diese Streuung enorm aus. Um die Auswirkung zu beziffern sind Aufnahmen aus der Ulbricht-Kugeln verwendet worden, da äußerliche Einflüsse auf die Streuung ausgeschlossen werden können.

Abbildung 6.25 zeigt den Verlauf der Grauwerte auf einer Linie dieser Aufnahmen. Es ist ein Bild ausgewählt worden, in dem die Helligkeit mit einem Grauwert von über 2000 in demselben Bereich liegt, wie Mess- oder Kalibrationsaufnahmen. Die Werte schwanken um einen Mittelwert von 2271 GW entlang der gesamten Linie. Die einzelnen Werte weichen jedoch stark von diesem Mittelwert ab. So ist ein Maximalwert von 2383 und ein Minimalwert von 2155 vorzufinden, was einer Streuung von $\pm 5\%$ im entspricht. Die Standardabweichung σ dieser Streuung und damit 68 % der Punkte liegen in einem Bereich von $\sigma = 39$ GW bzw. $\pm 1,73\%$. Wird nun im Zuge der Kalibrationsfahrt lediglich ein Pixel verwendet, um den entnommenen Grauwert mit dem Flussdichtewert des Radiometers zu verrechnen, so geschieht dies mit einem wahrscheinlichen Fehler von $\pm 1,73\%$. Um diesen Fehler zu senken wird der Grauwert aus einem Bildbereich von 3×3 Pixel berechnet. Die Anzahl von neun Pixeln senken den Fehler bei neun Punkten mit

$$\sigma_9 = \frac{\sigma}{\sqrt{9}} \quad (6.6)$$

auf $\pm 0,57\%$.

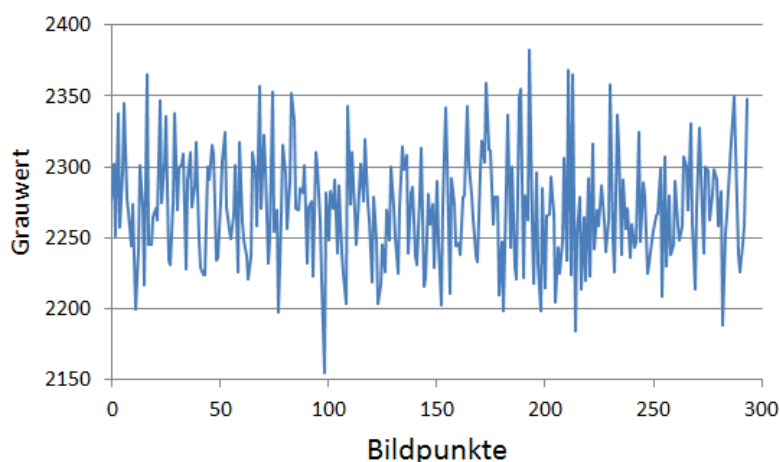


Abbildung 6.25: Streuung der Grauwerte

7 Genauigkeit des Messsystems

In diesem Kapitel soll abschließend die Genauigkeit des Messsystems untersucht werden. Die fehlerverursachenden Komponenten Target, Kamera und Radiometer sollen hierbei zuerst einzeln untersucht werden. Zuletzt werden die einzelnen Fehler in einer Gesamtbetrachtung zusammengeführt.

7.1 Target

7.1.1 Winkelabhängigkeit des Reflexionsgrads

Die auf eine Oberfläche einfallende Strahlung wird in einer Kombination aus spiegelnder und diffuser Reflexion zurückgeworfen. Auch die Oberfläche des Targets, die für eine fehlerfreie Funktion eine ideal diffuse Reflexion aufweisen müsste, unterliegt diesem Schema. Je nach Ein- oder Ausstrahlwinkel erfolgt demnach eine unterschiedlich starke Reflexion der Solarstrahlung, sodass winkelabhängige Messfehler verursacht werden. Zwar befindet sich die Kamera dauerhaft an derselben Position, sodass der Ausstrahl- oder Beobachtungswinkel konstant ist, jedoch variieren die Einstrahlwinkel durch die unterschiedlichen Entfernungen der Heliostaten zum Turm zwischen einem Elevationswinkel θ von 4° bis 46° . Der Einfluss dieser Einstrahlwinkel wird nun genauer untersucht. Da bereits winkelabhängige Reflexionsmessungen der verwendeten Targetbeschichtung von Ullmer [6] durchgeführt worden sind, werden diese Messdaten zu Grunde gelegt.

Ausgehend von einer ideal diffusen Fläche, ist eine konstante Strahlungsdichte L in alle Abstrahlrichtungen zu erwarten. Das Lambertsche Kosinusgesetz

$$L = \frac{I(\theta)}{A \cdot \cos(\theta)} \quad (7.1)$$

führt nun dazu, dass bei konstanter Strahlungsdichte die Strahlungsstärke mit dem Kosinus abnimmt.

$$I(\theta) \sim A \cdot \cos(\theta) \quad (7.2)$$

Obwohl eine solche Fläche von allen Betrachtungswinkel gleich hell erscheint, nimmt die Strahlungsstärke, aufgrund des abnehmenden reflektierten Strahlquerschnitts, ab.

Ein Strahlungsstärkesensor, welcher die beschichtete Fläche vermisst, sollte demzufolge einen Kosinusverlauf annehmen.

In Abbildung 7.1 ist eine Messung unter einem Beobachtungswinkel von 0° dargestellt. Im Messaufbau wird der Strahlungsstärkesensor hierbei einem festen Beobachtungswinkel zugeordnet, wobei 0° eine senkrechte Betrachtung auf die beschichtete Probe bedeutet. Die Lichtquelle wird anschließend über eine Dreheinheit eingestellt, sodass beliebige Einfallswinkel realisiert werden können. Da aufgrund des Aufbaus keine Messung unter einem Elevationswinkel von 0° möglich war, ist die Messung auf einen Einfallswinkel von 15° normiert worden. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Beschichtung gut der Kosinuskurve annähert und demzufolge auch einer ideal diffusen Fläche. Zudem ist eine leichte Überhöhung bei Einfallswinkeln nahe dem Beobachtungswinkel zu erkennen. Während die geringe Abweichung über weite Teile des Einfallswinkels vernachlässigt wird gilt es die Auswirkung eines solchen Sonderfalls von Einfallswinkel gleich Beobachtungswinkel genauer zu untersuchen, da die Kamera im Heliostatfeld positioniert ist und diese Kombination im Betrieb vorhanden ist. In Abbildung 7.2 ist die gleiche Messung mit einem Beobachtungswinkel von 40° aufgezeigt. Hier ist der prinzipielle Kosinusverlauf erneut zu erkennen, allerdings mit einer deutlichen Abweichung in der Nähe des Beobachtungswinkels. In dem Bereich von $40^\circ \pm 15^\circ$ verlässt die Kurve den in Abbildung 7.1 dargestellten Verlauf und es kommt zu einer verstärkten Reflexion. Da bei einem Einfallswinkel von 40° keine Messwerte aufgezeichnet werden können ist dieser Bereich interpoliert worden.

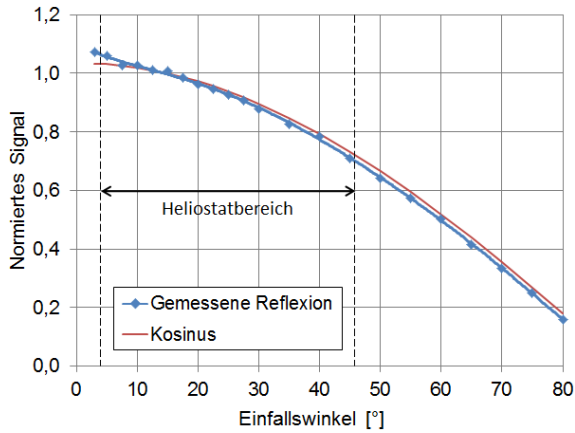


Abbildung 7.1: Winkelabhängigkeit der Reflexion bei einem Beobachtungswinkel von 0°

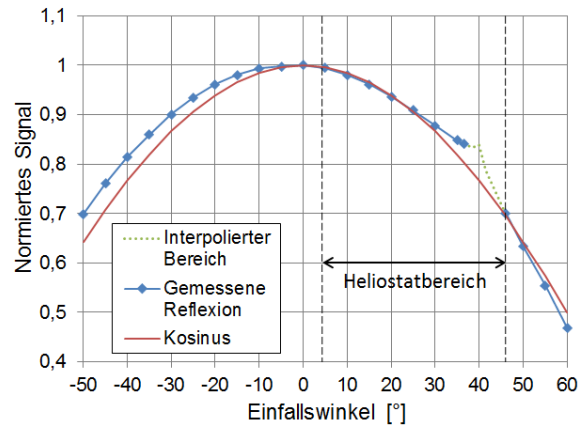


Abbildung 7.2: Winkelabhängigkeit der Reflexion bei einem Beobachtungswinkel von 40°

Um die Auswirkung dieser Verstärkung abschätzen zu können wird der Fehler durch Integration der beiden Kurven im relevanten Bereich von 25° bis 55° bestimmt. Die Fläche S_i der normierten Strahlstärkekurve lässt sich mit

$$S_i = \int_{25}^{55} I_{norm}(\theta) d\theta \quad (7.3)$$

berechnen, während mit

$$S_c = \int_{25}^{55} \cos(\theta) d\theta \quad (7.4)$$

die Fläche S_c der Kosinuskurve ermittelt wird. Der Fehler $\Delta F_{t,s}$, hervorgerufen durch das Überschneiden von Beobachtungs- und Einstrahlwinkel, wird nun folgendermaßen errechnet:

$$\Delta F_{t,s} = \frac{S_i - S_c}{S_c} \cdot 100\% \quad (7.5)$$

Es ergibt sich ein Fehler von 1,99 %. Im Unterschied zu dieser Messung, befindet sich die Kamera jedoch bei einem Beobachtungswinkel von $17,8^\circ$. Da für diesen Beobachtungswinkel keine Messungen vorliegen wird der Fehler von 1,99 % auch auf diesen Beobachtungswinkel angewendet. Unterstützt wird dieses Vorgehen durch den Fehler bei einem Beobachtungswinkel von 0° . Dieser beträgt ebenfalls 1,91 %, sodass davon ausgegangen werden kann, dass dazwischenliegende Beobachtungswinkel in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Wird von einer verfälschten Reflexion im Bereich von $17,8^\circ \pm 15^\circ$ ausgegangen, sind alle Heliostate betroffen deren Entfernung größer als 40 m zum Turm ist (siehe Abb. 7.3). Dies umfasst das gesamte Feld, bis auf die 122 Heliostate in den ersten vier Reihen.

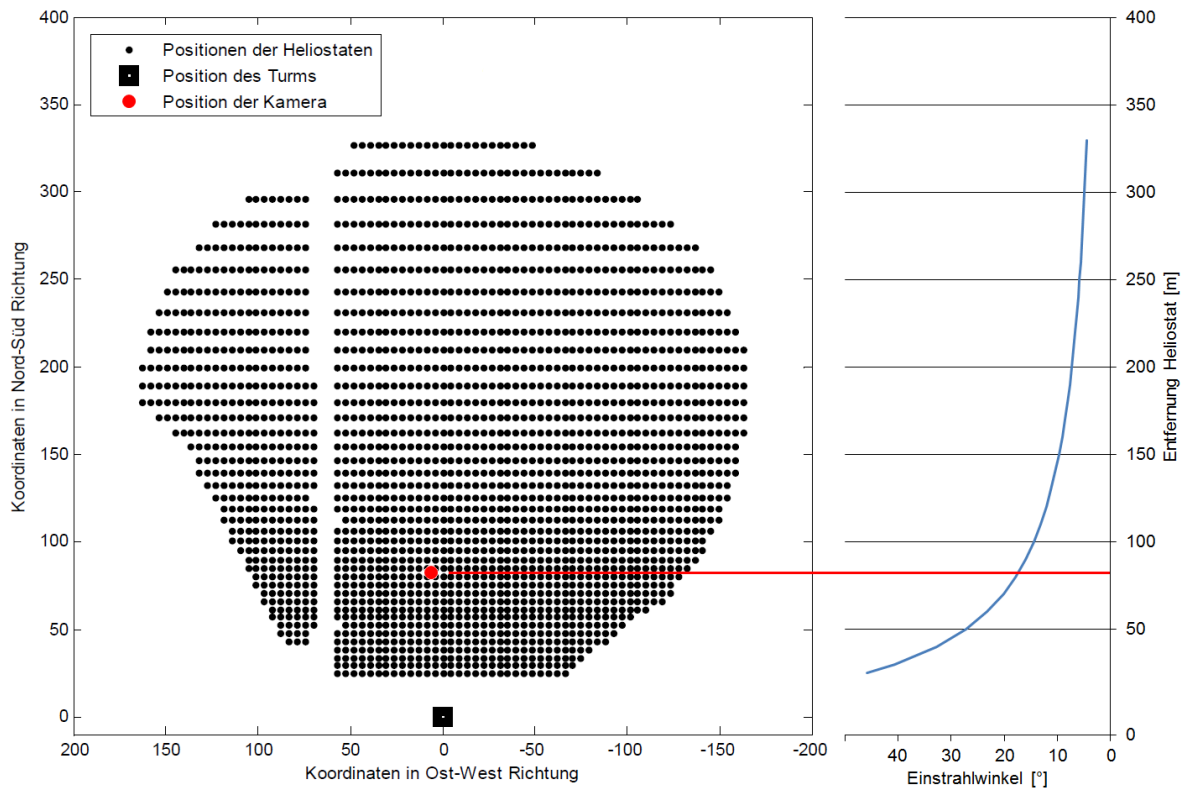


Abbildung 7.3: Einstrahlwinkel der Heliostate inkl. Position der Kamera im Feld

Da unmittelbar vor jeder Messung eine Kalibration durchgeführt wird, gleicht der ermittelte Faktor diese Verstärkung im Grunde aus. So wird ein leicht erhöhter Grauwert gemessen, dieser aber anschließend mit der realen Flussdichte des Radiometers gekoppelt, sodass in der Auswertung kein Fehler entsteht. Würden nun alle Heliostate exakt auf den Testreceiver ausgerichtet sein, könnte diese Fehlerbetrachtung vernachlässigt werden. Jedoch unterliegt die Ausrichtung der Heliostate, aufgrund der verwendeten Antriebe, einer großen Ungenauigkeit. Hinzukommend werden Bereiche des Heliostatfeldes, bestehend aus 60 Heliostaten, einzeln fokussiert und ausgerichtet. Es ist demnach vorstellbar, das verstärkende Heliostate vorwiegend den oberen Teil des Testreceivers bestrahlen, während die vorderen Heliostate auf die Mitte fokussiert sind. Auf diese Weise würden keine der verstärkenden Heliostate die Kalibration beeinflussen, im oberen Bereich würde jedoch eine Verstärkung der Flussdichte auftreten. Der wahrscheinliche Fehler, verursacht durch die winkelabhängige Reflexion des Targets, wird deshalb auf $\pm 0,5\%$ geschätzt.

7.2 Kamera

7.2.1 Linearität

Im Zuge der Grauwertkalibration wird ein Kalibrierfaktor berechnet, welcher einem bestimmten Grauwert eine gemessene Flussdichte zuordnet. Wird an einer anderen Position auf dem Testreceiver ein höherer Grauwert verzeichnet, wird diesem Punkt entsprechend eine im gleichen Verhältnis erhöhte Flussdichte zugewiesen. Dieses Verfahren beruht auf einem linearen Verhalten der Kamera. Trifft eine doppelte Lichtmenge auf den Sensor, sollte der Fotoeffekt im Innern des Kamerasensor eine doppelte Menge an Elektronen herauslösen und somit einen doppelt so hohen Grauwert ausgeben.

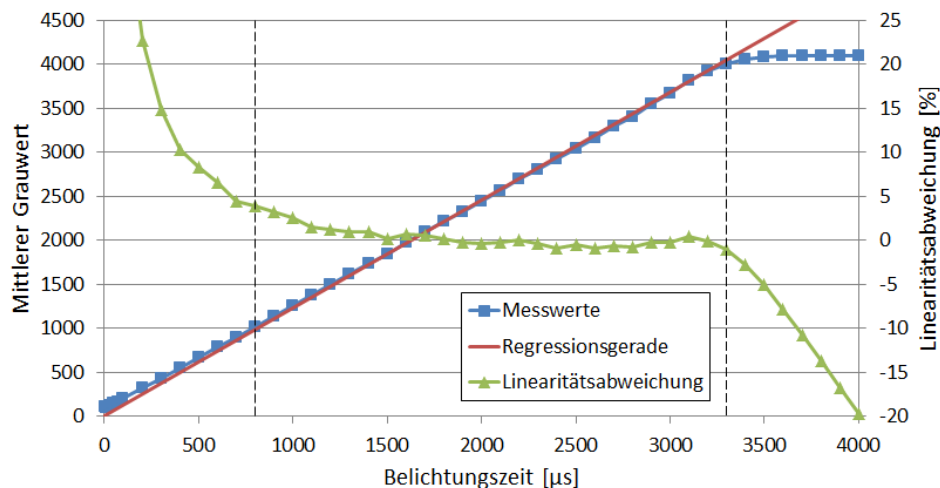


Abbildung 7.4: Linearität der Prosilica GT2000 mit Linearitätsabweichung

In Kapitel 6.2.2 ist dieses lineare Verhalten bereits untersucht worden, mit dem Ergebnis eines guten linearen Verhaltens im Bereich zwischen 1100 und 3300. Um den

Dynamikbereich jedoch zu erweitern ist der untere Grenzwert auf 800 verlegt worden. In diesem Abschnitt soll zusätzlich eine Fehlerrechnung hinzugefügt werden.

In Abbildung 7.4 ist die Linearität erneut aufgetragen. Zudem ist die prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte zur Regressionsgeraden eingezeichnet. In dem zur Auswertung verwendeten Bereich treten Abweichungen von +3,8 % bis -1,0 % auf. Im Rahmen einer konservativen Fehlerschätzung werden diese Werte verwendet.

7.2.2 Dunkelstrom

Der Dunkelstrom ist in Kap. 6.5.2 bereits erklärt worden, sodass hier lediglich der Restfehler quantifiziert werden soll. Die Betrachtung beruht lediglich auf den Dunkelstrommittelwerten gesamter Aufnahmen, da die Ermittlung des Fehlers, hervorgerufen durch das Bildrauschen, in einer separaten Untersuchung erfolgt.

Der Dunkelstrommittelwert je gesamte Aufnahme unterliegt einer Streuung mit einer Standardabweichung von $\sigma_d = \pm 3\%$ bezogen auf den Korrekturwert von 73. Wird dieser Wert auf den geringsten Grauwert von 800 bezogen so ergibt sich ein Fehler von $\pm 0,27\%$.

7.2.3 Shading

Ein weiterer Fehlereffekt des Kamerasystems wird durch das Objektiv und der darin enthaltenen Anordnung der Linsen verursacht. So werden gleich helle Objekte, je nach Position im Bild, unterschiedlich hell dargestellt. Bei dem verbauten Objektiv ist dieser Effekt, unter den verwendeten Einstellungen, sehr stark ausgeprägt. Die Helligkeit einer gleichmäßig strahlenden Fläche liegt hierbei im Zentrum um 20% über dem Durchschnitt und am Bildrand um 11% darunter. Hinzukommend bewirken Staub und Verunreinigungen auf den Linsen lokale Verdunklungen.

Um diesen Fehlereffekt zu ermitteln wird eine Aufnahme von einer gleichmäßig hellen Fläche in einer Ulbricht-Kugel gemacht. Um den Shading-Effekt hervorzuheben ist in Abbildung 7.5 eine Aufnahme mit einem erhöhten Kontrast aufgezeigt. Die weiße

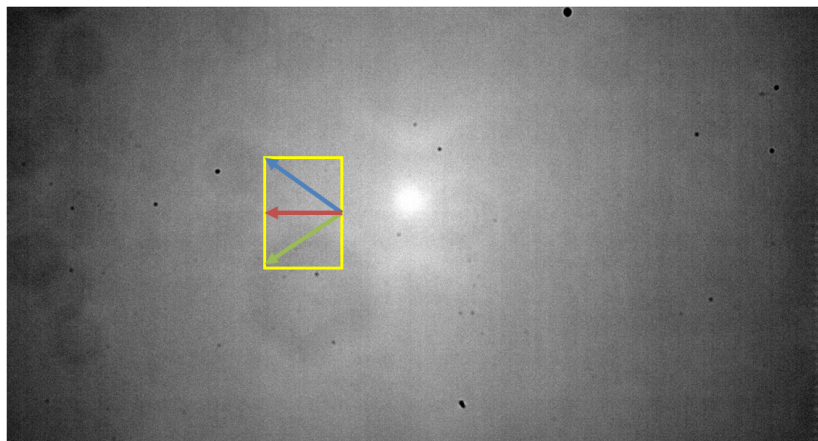


Abbildung 7.5: Aufnahme aus einer Ulbricht-Kugel mit erhöhtem Kontrast

Fläche in der Mitte des Bildes und die abnehmende Helligkeit nach außen hin ist hier deutlich zu erkennen. Dieser Fehler wirkt sich jedoch deutlich geringer aus, als die erwähnten Prozentwerte dies vermuten lassen, da lediglich ein kleiner Ausschnitt des Bildes zur Auswertung herangezogen wird (gelbes Rechteck).

Aber selbst in diesem Ausschnitt sind die Auswirkungen des Shading-Effekts zu beobachten. In Abbildung 7.6 sind hierfür die Entwicklungen der Grauwerte auf den farblich markierten Linien aus Abbildung 7.5 aufgezeigt. Für eine verbesserte Darstellung wird die Streuung des Grauwerts reduziert, indem ein gleitender Durchschnitt über 20 Werte aufgetragen wird. Alle drei Kurven zeigen hierbei ein deutliches Abfallen des Grauwerts. Die grüne Kurve wird durch den Einfluss eines Staubpartikels, erkennbar an dem leicht abgedunkelten Sechseck am unteren Ende des gelben Rechtecks, zusätzlich abgesenkt, sodass sie im weiteren Verlauf unter der roten und blauen Kurve liegt.

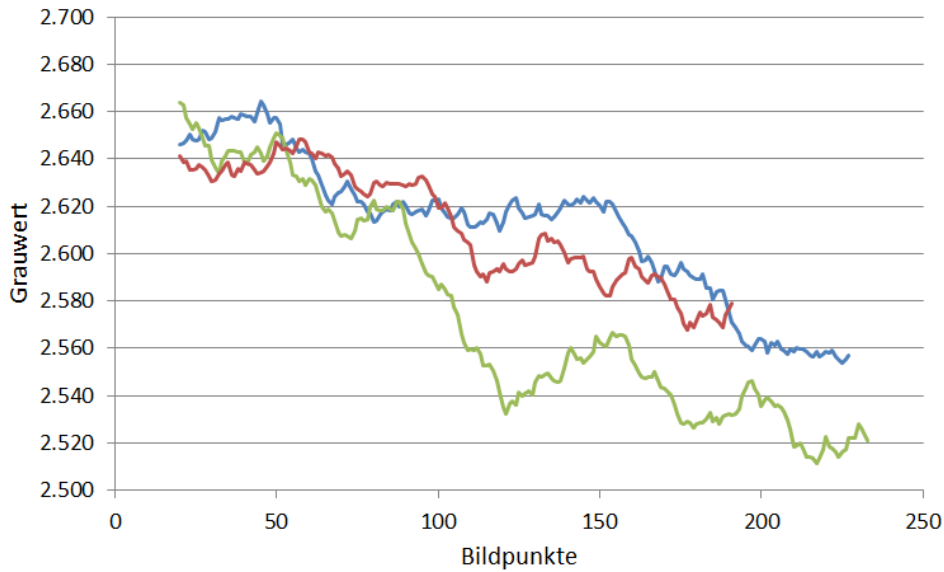


Abbildung 7.6: Grauwertentwicklung im Bereich des Testreceivers

Der verursachte Fehler des Shading-Effekts, inklusive des Staubpartikels, wird nun ermittelt, indem der Mittelwert aller im relevanten Ausschnitt befindlichen Grauwerte mit

$$GW_m = \frac{\sum_{1 \leq i \leq i_{max} \atop 1 \leq j \leq j_{max}} GW(i, j)}{i_{max} \cdot j_{max}} \quad (7.6)$$

berechnet wird. Dieser mittlere Grauwert beträgt 2443 GW und wird nun in Relation zu dem Grauwert gesetzt, welcher sich aus den beiden Kalibrationspunkten ergibt. Diese befinden sich mittig am unteren Ende und nahezu im Schwerpunkt des Ausschnitts (siehe Abb. 7.7). Sie liegen somit in helleren Bildbereichen, sodass sich ein Kalibriergrauwert von $GW_k = 2593$ ergibt. Dieser liegt um 6,1 % über dem mittleren Grauwert, sodass die integrierte Flussdichte über die gesamte Receiverfläche aufgrund des Shading- und Staubpartikelfehlers um 6,1 % unterschätzt wird.

Werden hingegen lokale Auswertungen vorgenommen, beispielsweise die Flussdichte

über einzelne Receivercups gemittelt, können deutlich höhere Fehler im positiven und negativen Bereich auftreten.

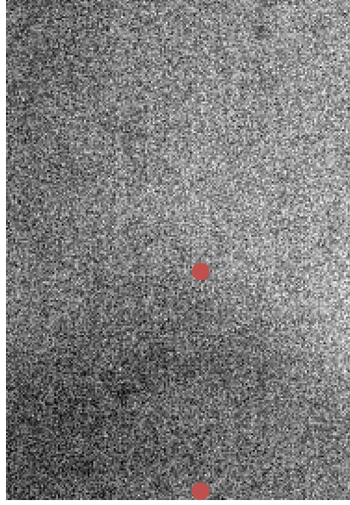


Abbildung 7.7: Auswertungsausschnitt mit erhöhtem Kontrast inkl. eingezeichneten Kalibrierpositionen

7.3 Gesamtbetrachtung

Der Gesamtfehler des Messsystems setzt sich aus den einzelnen Komponenten und deren spezifischer Fehler zusammen. In Tabelle 7.1 sind diese im Einzelnen aufgeführt. Einige Fehler, wie die spektrale Gewichtung der Kamera oder die spektrale Reflektivität, werden durch die Kalibration eliminiert und sind somit nicht gelistet. Der wahrscheinliche Gesamtfehler wird gemäß dem Fehlerfortpflanzungsgesetz von Gauß aus den Fehlern der einzelnen Komponenten berechnet. Statistische Fehler, die sowohl negative als auch positive Werte annehmen können, gehen hierbei mit der Wurzel aus der Summe ihrer Quadrate ein, da es sehr unwahrscheinlich ist, dass diese gleichzeitig ihr Maximum mit identischen Vorzeichen annehmen. Systematische Fehler werden zu diesem Ergebnis addiert, sodass der Gesamtfehler ΔF_{ges} mit

$$\Delta F_{ges} = \pm \sqrt{(0,27\%)^2 + (0,57\%)^2 + (0,5\%)^2 + (3\%)^2 + (0,55\%)^2} \quad (7.7)$$

$$+ (0,1\%)^2 + 3,8\% - 1,1\% - 6,1\% = -10,4\% \dots + 0,9\%$$

berechnet wird. Die Radiometergenauigkeit ist ebenso den Herstellerangaben entnommen worden, wie die Genauigkeit des Messumformers und des Messmoduls [33] [15] [13]. Die Fehlerangabe für das Bildrauschen ist Kapitel 6.5.3 entnommen.

Neben der aufgelisteten Fehlerquellen, wird das Messergebnis durch weitere Einflüsse beeinträchtigt: Positionierfehler der Kalibration der Kameraposition, Messebene befindet sich 30 cm vor der Testreceiverfläche, Unregelmäßigkeiten in der Beschichtung auf der Targetoberfläche. Auf die Untersuchung dieser Fehlereinflüsse muss aus Zeitgründen verzichtet werden.

Komponente	Fehlerquelle	Fehler
Kamerasystem	Linearität	-1,0 % .. +3,8 %
	Dunkelstrom	$\pm 0,27$ %
	Shading	-6,1 %
	Rauschen	$\pm 0,57$ %
Target	Winkelabhängige Reflexion	$\pm 0,5$ %
Radiometer	Messunsicherheit	± 3 %
	Messumformer	$\pm 0,55$ %
	Messmodul	$\pm 0,1$ %
Wahrscheinlicher Gesamtfehler		-10,4 % .. +0,9 %

Tabelle 7.1: Fehlerquellen und Gesamtfehler des Messsystems

8 Zusammenfassung

Der Hintergrund zur Bearbeitung dieser Masterthesis ist durch die notwendige Weiterentwicklung der solarthermischen Stromerzeugung gegeben. Eine wichtige Komponente um den Wirkungsgrad der einzelnen Komponenten zu erhöhen und damit gleichzeitig die Stromgestehungskosten zu reduzieren ist die Verfügbarkeit eines Messsystems zur Bestimmung der solaren Eingangsleistung. Hierin liegt die Aufgabenstellung dieser Masterthesis, welche im Konkreten durch drei Teilziele formuliert werden kann: Entwicklung weiterer Systemkomponenten, Programmierung des Messsystems und Untersuchung der Messgenauigkeit.

Im ersten Schritt wurde die zum Teil vorbereitete Messeinrichtung um fehlende Komponenten erweitert und es wurden bereits bestehende Komponenten optimiert. Hierzu gehören im Wesentlichen die Kühlsysteme für die Temperaturbeständigkeit. Das bestehende Konzept der Movingbarkühlung wurde durch die Erweiterung eines Gebläses optimiert, während die Radiometerkühlung gänzlich umgestaltet wurde um die Temperaturbeständigkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten. Temperatur- und Flussdichtesensoren mussten zu diesem Zweck ebenfalls in die Movingbar integriert und mithilfe einer geeigneten Signalwandlung ausgelesen werden. Weiterhin ist die Targetkonstruktion korrigiert worden, um das Auftreten eines Detektionsfehlers zu unterbinden. Letztendlich stand ein temperaturbeständiges Messsystem, bestehend aus Movingbar, Radiometer, Kamera und Messrechner bereit, um durch eine geeignete Programmierung Flussdichtemessungen zu ermöglichen.

Dies war Inhalt des zweiten Teilziels. In der Entwicklungsumgebung LabVIEW ist die Programmierung realisiert worden, indem eine Struktur aus zwei parallelen Schleifen angelegt wurde. In der Einen ist im Wesentlichen die Systemüberwachung untergebracht, während in der Anderen die Kalibrations- und Messfahrt ausgeführt wird. Im Zuge der Messfahrt übernimmt LabVIEW lediglich die Bildaufnahme, während die Auswertung von einem Matlabalgorithmus durchgeführt wird, der automatisch im Hintergrund ausgeführt wird. Eine Bedienoberfläche ermöglicht selbst ungeschulten Bedienern eine sichere und einfache Messung, da ein hoher Automatisierungsgrad gekoppelt mit internen Sicherheitseinrichtungen realisiert wurde.

Im letzten Teil wurde die Genauigkeit des Messsystems auf $-10,4\%$ bis $+0,9\%$ abgeschätzt. Hierfür wurden die Fehlerquellen der einzelnen Komponenten untersucht und zusammengeführt. Entscheidende Fehlerquellen sind hierbei der unkorrigierte Shadingeinfluss, sowie die Verwendung einer Kamera mit CMOS-Sensor, da dies starkes Rauschen und eine schlechte Linearität zur Folge hat.

9 Ausblick

9.1 Weiterentwicklung des Messsystems

Nachdem gezeigt wurde, dass die Funktionsfähigkeit des Messsystem erreicht ist, werden nun Messungen im Rahmen der beschriebenen Genauigkeit durchgeführt. Das Verbundprojekt SiBops (Simulationsunterstützte Betriebsoptimierung für Solarturmkraftwerke), in dem das DLR-Institut für Solarforschung gemeinsam mit Industrie- und Forschungspartnern an softwarebasierten Methoden zur Verbesserung des Betriebs solarthermischer Turmkraftwerke arbeitet, nutzt hierbei ebenso das Messsystem, wie das Forschungsprojekt INDUSOL (Industrialisierung von keramischen Solarkomponenten), in dem feinere Poren in der Wabenstruktur der Keramik, aber auch Metallreceiver mit noch feineren Strukturen, getestet werden. Um den Forschern einfachere und genauere Messungen zu bieten, gilt es das System weiter zu verbessern.

9.1.1 Erhöhung des Automatisierungsgrades

Da es sich als vorteilhaft erwiesen hat, vor jeder Messung eine separate Kalibrierung durchzuführen, um die spektrale Abhängigkeit des Targets und der Kamera zu eliminieren, sowie den Fehler durch die winkelabhängige Reflexion zu minimieren, kann die Kalibrations- und Messfahrt zusammengelegt werden. Im Zuge der Messfahrt kann hierbei an mehreren Punkten ein Flussdichtewert entnommen werden, welcher im Zuge der Auswertung mit den entsprechenden Grauwerten zu einem Kalibrierfaktor berechnet und sofort angewendet wird. Eine weitere Möglichkeit verbirgt sich in der Kalibration der Kameraposition. Diese könnte automatisiert im Hintergrund ablaufen und die Kameraausrichtung vor jeder Messung ermitteln. Dies kann mit einer Konturerkennung realisiert werden, da die Voraussetzung mit einem hohen Kontrast zwischen Testreceiver und Strahlungsschutz gegeben ist. Beide Maßnahmen verringern den zeitlichen Aufwand und erhöhen den Automatisierungsgrad, was sich positiv auf die Benutzerfreundlichkeit des Systems auswirkt.

9.1.2 Verbesserung der Sicherheitsvorrichtungen

Trotz einiger umgesetzter Vorsichtsmaßnahmen, sollten weitere hinzugefügt werden. Eine erforderliche Sicherheitsvorrichtung betrifft den Durchflusswächter und die Tempe-

raturmessung. Sollte der Durchflusswächter trotz eingeschaltetem Kühlaggregat nicht geschaltet sein und somit das Radiometer die Wasserkühlung verlieren, muss ebenso eine Reaktion erfolgen, wie beim Überschreiten von Grenztemperaturen. In beiden Fällen muss die Movingbar in einem ersten Schritt in die Parkposition gefahren und für weitere Fahrten gesperrt werden. Dies schiebt eine Beschädigung jedoch nur hinaus, da selbst in der Parkposition eine hohe Temperaturbelastung bei ausgefallener Kühlung vorhanden ist. In einem weiteren Schritt sollte das Heliostatfeld automatisch defokussiert werden. Jedoch besteht hierauf aktuell noch kein Zugriff aus dem Vorbereitungsraum der Forschungsebene. Dies soll in naher Zukunft aber ermöglicht werden.

9.2 Verbesserung der Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit des Systems kann durch zwei Wesentliche Maßnahmen enorm gesteigert werden. Zum einen betrifft dies die verwendete Kamera AVT Prosilica GT2000. Die hat sich als ungeeignet für den Einsatz in einem Flussdichtemesssystem erwiesen. Dies liegt in erster Linie an dem verbauten CMOS-Sensor, welcher ein starkes Rauschen und einen geringen linearen Bereich aufweist. Infolge dieser beiden Fehlerquellen kommt es zu einer Messungenauigkeit von $-1,57\%$ bis $+4,37\%$. CCD-Sensoren weisen in dieser Hinsicht deutlich bessere Eigenschaften auf. Fehlerabschätzungen für CCD-Sensoren lassen einen Messfehler von $-0,15\%$ bis $+1,25\%$ vermuten, sodass die verwendete Kamera ausgetauscht werden sollte, um eine deutlicher verbesserte Messgenauigkeit zu erhalten. [6] [8]

Neben einem Austausch der Kamera sollte eine Shading-Korrektur hinzugefügt werden. Dieser Fehler tritt unabhängig von der Kamera auf, da er durch das Objektiv verursacht wird. Hierdurch sollte der verursachte Fehler auf ein Minimum absinken. Die beiden erwähnten Maßnahmen sollten den wahrscheinlichen Gesamtfehler auf $\pm 4\%$ einschränken.

Literaturverzeichnis

- [1] DUDLEY, Bob: *BP Energy Outlook 2030*. Januar 2013
- [2] DENA GMBH: *renewables-made-in-germany.com*. "<http://www.renewables-made-in-germany.com/de/start/solarthermische-kraftwerke/solarthermische-kraftwerke/allgemein.html>", Abgerufen: 18.08.2014
- [3] KRINNER GMBH: *krinner.com - Produkte - CSP-Systeme*. "http://www.krinner-solarsystem.de/fileadmin/user_upload/gallery/919/solarturm.png", Abgerufen: 18.08.2014
- [4] KOST, Christoph ; SCHLEGL, Thomas ; THOMSEN, Jessica ; NOLD, Sebastian ; MEYER, Johannes: *Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energie / Fraunhofer-Institut ISE*. Mai 2012. – Forschungsbericht
- [5] DLR E.V.: *dlr.de*. "http://www.dlr.de/sf/DesktopDefault.aspx?tabid=8560/15527_read-38159/gallery-1/gallery_read-Image.73.20814/", Abgerufen: 18.08.2014
- [6] ULMER, Steffen: *Messung der Strahlungsflussdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken*, Universität Stuttgart, Doktorarbeit, August 2003
- [7] DLR E.V.: *Interne Bilderdokumentation*
- [8] BENDER, Olaf: *Entwicklung und Anwendung eines Messsystems zur Bestimmung der Flussdichteverteilung auf einer Receiveroberfläche*, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, Februar 2011
- [9] KEM: *kem.de*. "http://www.kem.de/image/image_gallery?img_id=31401670", Abgerufen: 12.09.2014
- [10] SEQUOIA: *Sequoia.co.uk - Sensors - Industrial Sensors*. "http://www.sequoia.co.uk/vatell-water-cooled-thermogage-heat-flux-sensor_p_200.php", Abgerufen: 21.10.2014
- [11] ALLIED VISION TECHNOLOGIES GMBH: *alliedvisiontec.com - Produkte - Prosilica GT*. "http://www.alliedvisiontec.com/uploads/media/AVT-Prosilica-GT-Kowa_09.jpg", Abgerufen: 21.10.2014

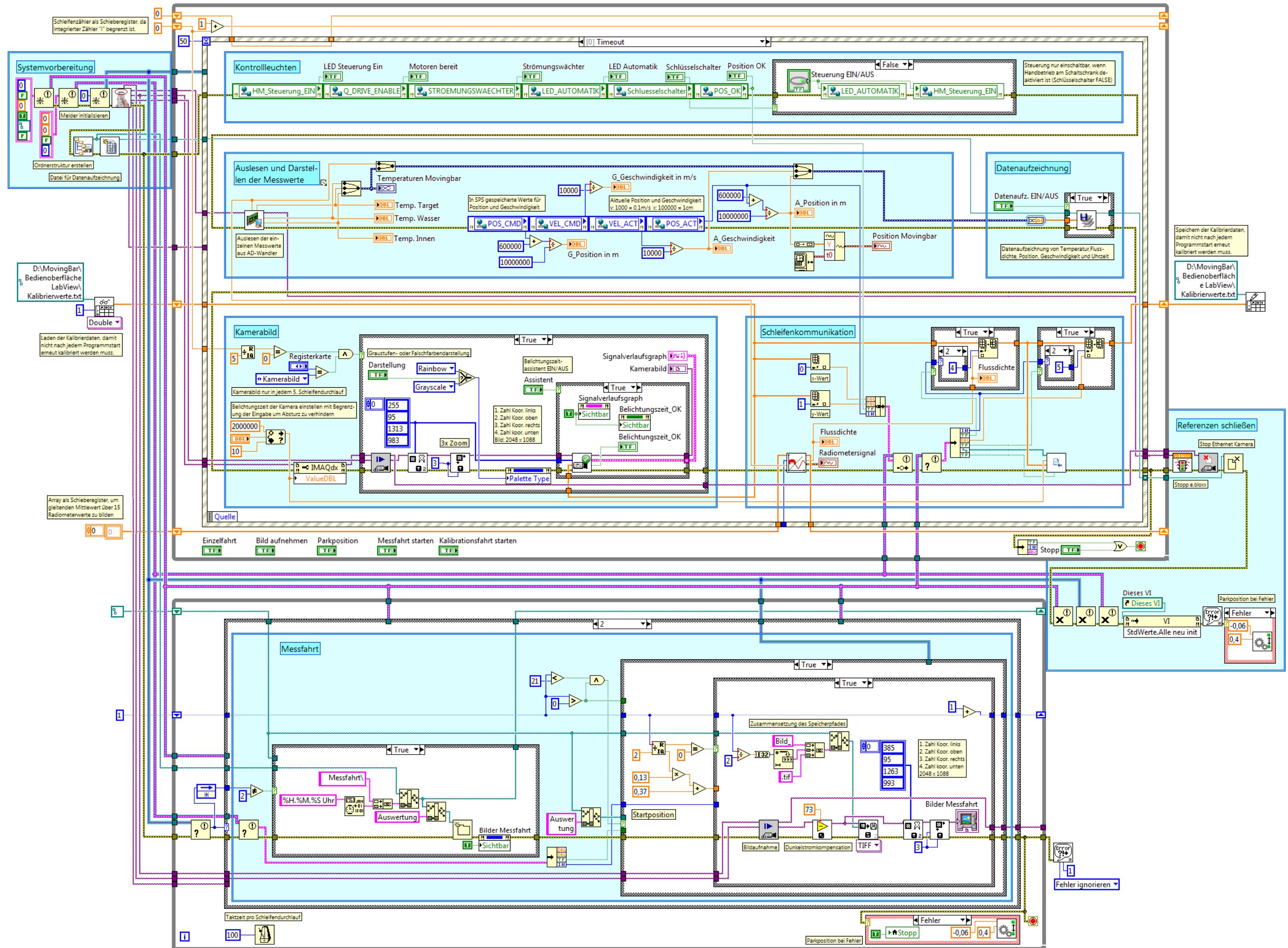
- [12] ES ELECTRONIC SENSOR GMBH: *electronic-sensor.de*. "http://www.electronic-sensor.de/images/produkte/1-mantelthermoelemente/1-1a.jpg", Abgerufen: 15.10.2014
- [13] GANTNER INSTRUMENTS GMBH: *e.bloxx A1 - Universelles Messmodul*, 2014
- [14] GANTNER INSTRUMENTS GMBH: *e.bloxx Terminal - Universelles Digitalmodul*, 2014
- [15] KNICK GMBH: *ThermoTrans A 20210*
- [16] JUMO GMBH UND CO. KG (Hrsg.): *Aufbau und Anwendung von Thermoelementen*. JUMO GmbH und Co. KG, Juli 2009
- [17] MÜLLER, W.: *Temperaturmessung mit Thermoelementen*. Carl-Enger-Schule Karlsruhe, März 2009
- [18] KOHLER, Stephan: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz - Aktualität und Dringlichkeit des Übergangs zu nachhaltigen Energien / Deutsche Energie-Agentur. April 2005. – Forschungsbericht
- [19] WINTER, C.-J. ; SIZMANN, Rudolf L. ; VANT-HULL, Lorin L.: *Solar Power Plants*. Springer Verlag, 1991 (ISBN 978-3-642-61245-9)
- [20] DLR E.V.: *dlr.de - Institut für Solarforschung - Großanlagen und solare Materialien - Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich*. Abgerufen: 18.08.2014
- [21] GÖHRING, F. ; HENNECKE, K. ; HOFFSCHMIDT, B. ; SCHMITZ, M. ; SCHWARZBÖZL, P.: 500kW-Forschungsplattform im Solarturm Jülich für Experimente mit hochkonzentrierter Solarstrahlung. In: *12. Sonnenkolloquium: Qualifizierung solarthermischer Kraftwerke*, Juni 2009
- [22] DLR E.V.: *dlr.de - Institut für Solarforschung - Großanlagen und solare Materialien - Receiver-Testanlage auf der Forschungsebene*. Abgerufen: 03.12.2014
- [23] BAEHR, Hans D. ; KABELAC, Stephan: *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer Verlag, 2012 (ISBN 978-3-642-24161-1)
- [24] NATIONAL INSTRUMENTS GERMANY GMBH: *Verschiedene Programmieransätze in NI LabVIEW*, August 2013
- [25] WIELAND, Marek ; GEBERT, Thomas: *Datenerfassung mit LabVIEW*
- [26] KOLL, Gerrit ; SCHWARTZ, Peter ; HENNECKE, Klaus ; HARTZ, Thomas ; SCHMITZ, Mark ; HOFFSCHMIDT, Bernhard: *The solar tower Jülich - A research and demonstration plant for central receiver systems*. September 2009
- [27] BOSCH REXROTH AG: *boschrexroth.com - Lineartechnik - Linearsysteme - Lineararmodule*. "http://www.boschrexroth.com/de/de/produkte/produktgruppen/lineartechnik/linearsysteme/linearmodule/index", Abgerufen: 12.09.2014

- [28] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH: 1.4301. "http://www.wirtgen.de/media/test_1/4Icons_WVHK1_medium.png", Abgerufen: 08.11.2012
- [29] AMETEK GMBH: *JOFRA ATC Series Dry Block Temperature Calibrators*. Juni 2000
- [30] KOMINEK, Darek: *OPC - was ist das eigentlich?* MatrikonOPC, 2009
- [31] VIPA GMBH: *How-To-Do - OPC-Server Kommunikation*, Oktober 2012
- [32] FOLKERTS, Hein O. ; MAAS, Joris: *Characterization of Dark Current in CMOS Image Sensors*
- [33] SEQUOIA TECHNOLOGY LTD: *Certificate of Calibration*, März 2013
- [34] ALLIED VISION TECHNOLOGIES GMBH: *GT2000/2000C*
- [35] VIDEOTEC S.P.A.: *GT2000/2000C*, Oktober 2014
- [36] COMET GMBH: *GiRO 24V*
- [37] GENTECH INTERNATIONAL LTD: *Flow Switch*, 2005

A Anhang

Anhangverzeichnis

A.1 Programmcode im Blockdiagramm	II
A.1.1 Hauptprogramm	II
A.1.2 Unterprogramme	X
A.2 Programmcode des Matlabalgorithmus	XV
A.3 Datenblätter	XVIII
A.3.1 Kamera: AVT Prosilica GT2000	XVIII
A.3.2 Radiometer: Sequoia TG1000-0	XIX
A.3.3 Messumformer: Knick ThermoTrans A 20210	XX
A.3.4 Messmodul: Gantner Instruments e.bloxx A1-1	XXII
A.3.5 Kameragehäuse: Videotec Verso	XXIV
A.3.6 Pumpe: Comet GIRO 24V	XXV
A.3.7 Durchflusssensor: Gentech FCS-03	XXVI



A.1 Programmcode im Blockdiagramm

A.1.1 Hauptprogramm



Abbildung A.1: Übersicht inklusive Ereigniscase Timeout in Schleife 1

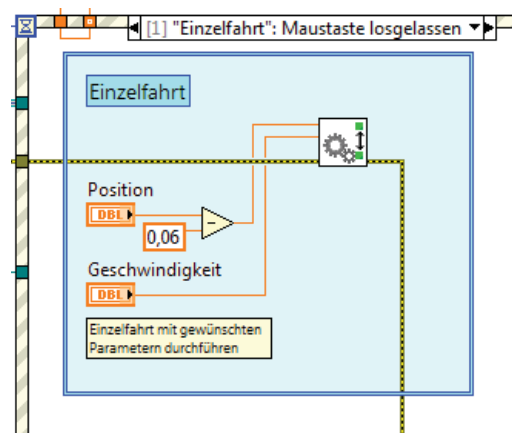


Abbildung A.2: Schleife 1, Ereigniscase: Buttonbetätigung Einzelfahrt

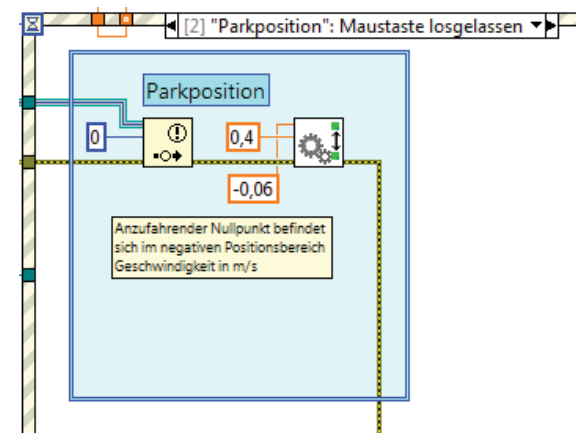


Abbildung A.3: Schleife 1, Ereigniscase: Buttonbetätigung Parkposition

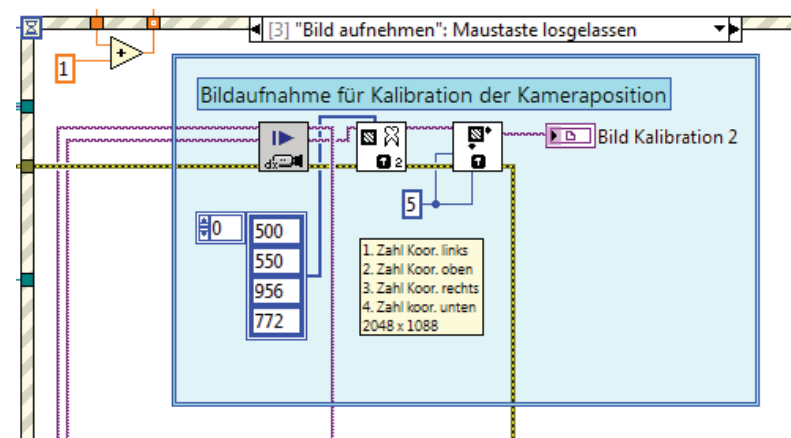


Abbildung A.4: Schleife 1, Ereigniscase: Buttonbetätigung der Bildaufnahme für die Kamerakalibration

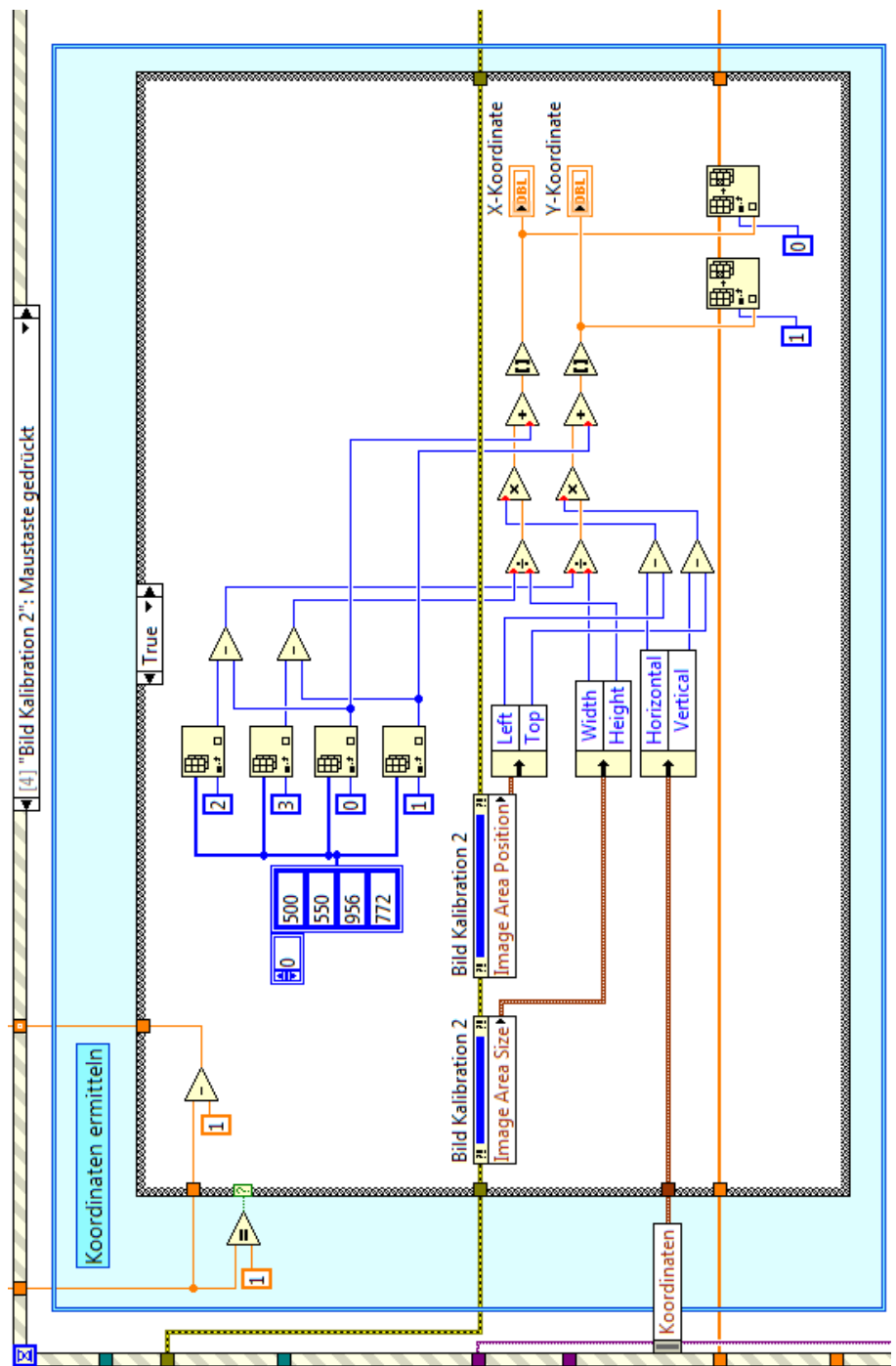


Abbildung A.5: Schleife 1, Ereigniscase: Mausklick im Kamerabild

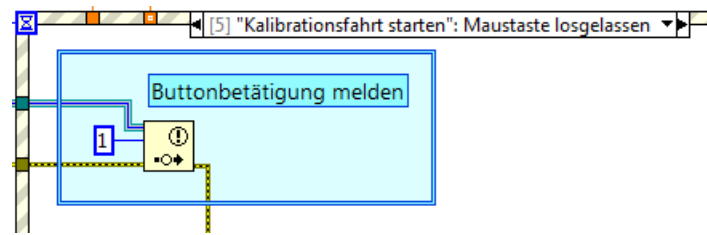


Abbildung A.6: Schleife 1, Ereigniscase: Buttonbetätigung Kalibrationsfahrt

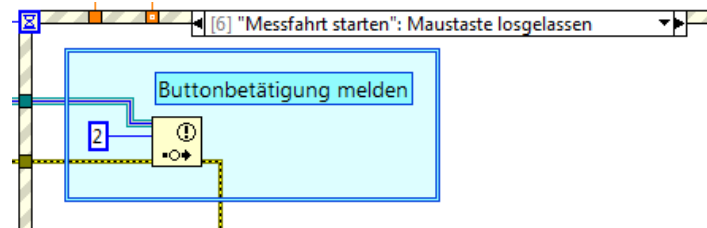


Abbildung A.7: Schleife 1, Ereigniscase: Buttonbetätigung Messfahrt

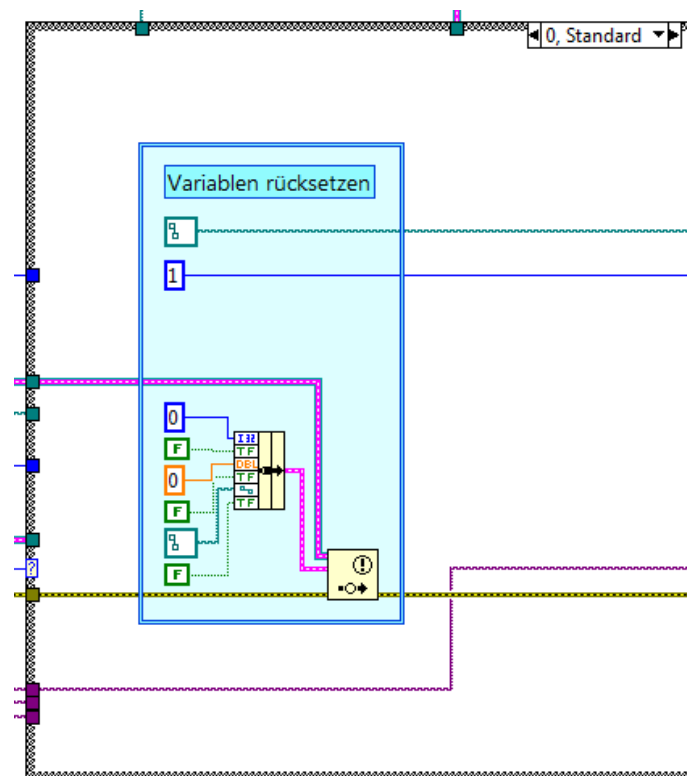


Abbildung A.8: Schleife 2, Fall: Bereitschaft

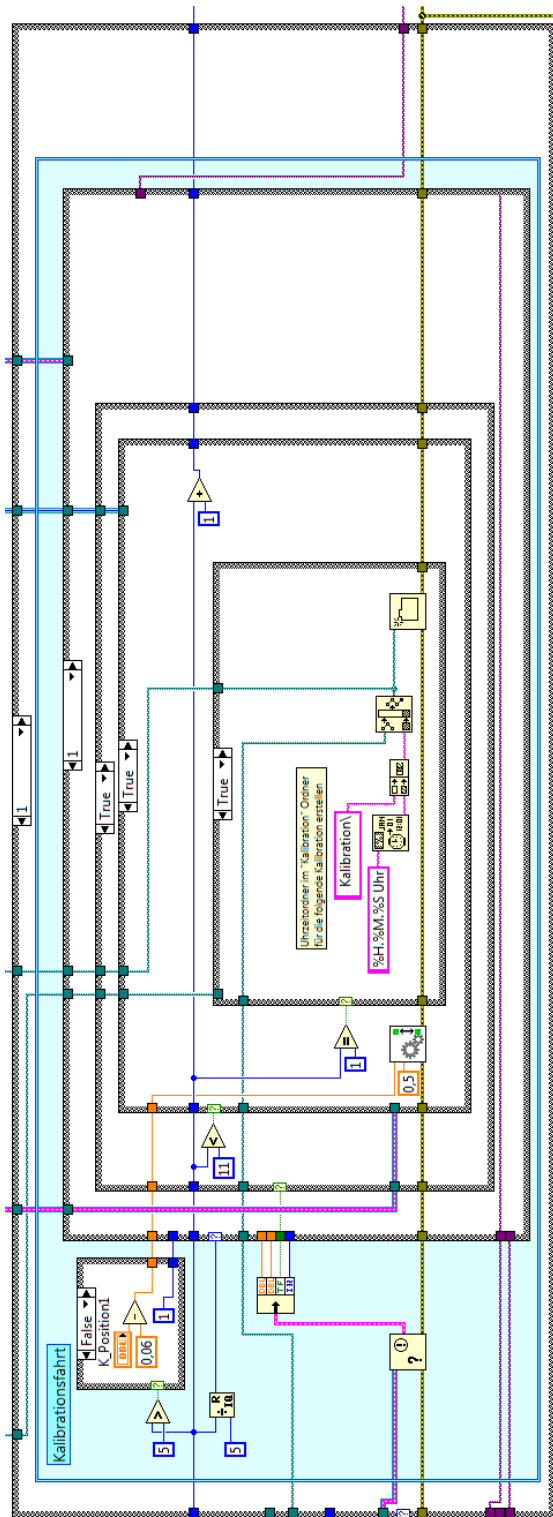


Abbildung A.9: Schleife 2, Fall: Kalibrationsfahrt, Case 1

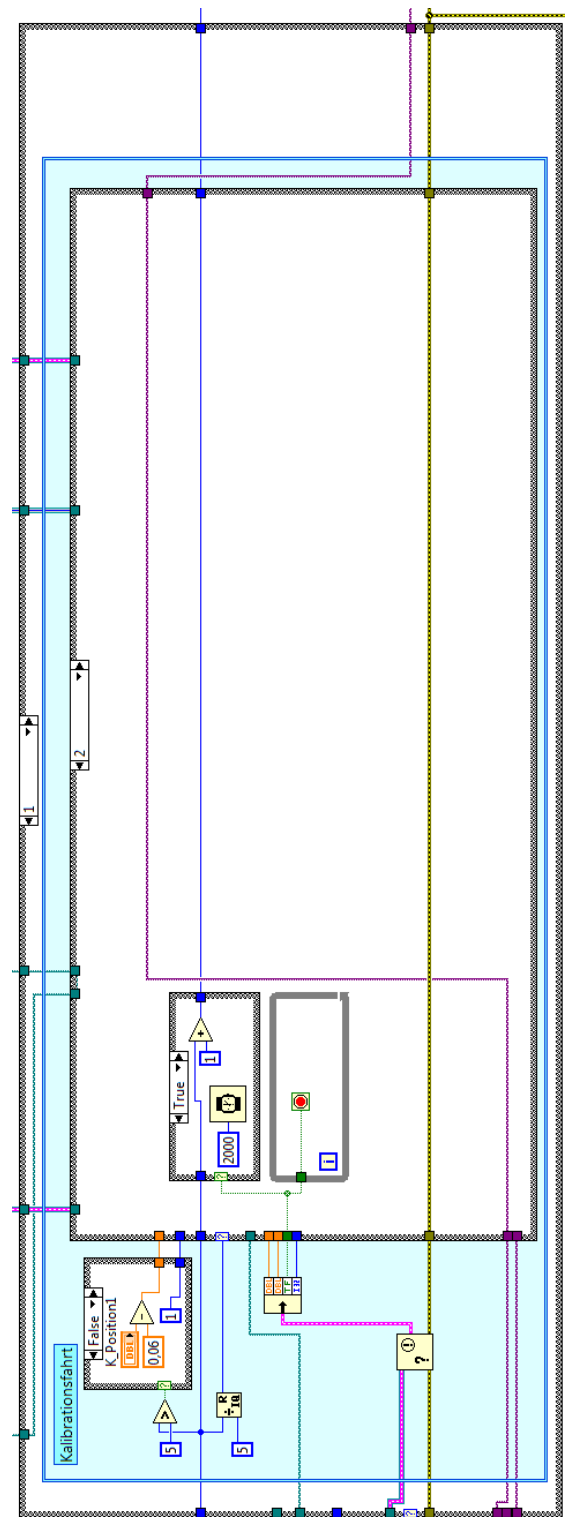


Abbildung A.10: Schleife 2, Fall: Kalibrationsfahrt, Case 2

The screenshot displays a Simulink control system for a vehicle's position control. The model is organized into several functional blocks:

- Kalibrationsfahrt (Calibration Drive):** This block, located at the bottom left, contains a 'False' input and a 'K_p PositionL' gain block with a value of 0.06. It also includes a '0.01' gain block and a '0.05' gain block.
- Positionierung (Positioning):** This block, located in the center, contains a 'True' input and a '0.0005' gain block. It also includes a '10000000' gain block and a '0.5' gain block.
- Positionierung 0.5mm:** This block, located at the top right, contains a '0.5mm' input and a '0.05' gain block.

The system uses a feedback loop with a gain of 0.05, a derivative gain of 0.0005, and an integral gain of 10000000. The output is compared with a reference value of 0.5mm. The model is set to 'True' for the 'Positionierung' block.

VI

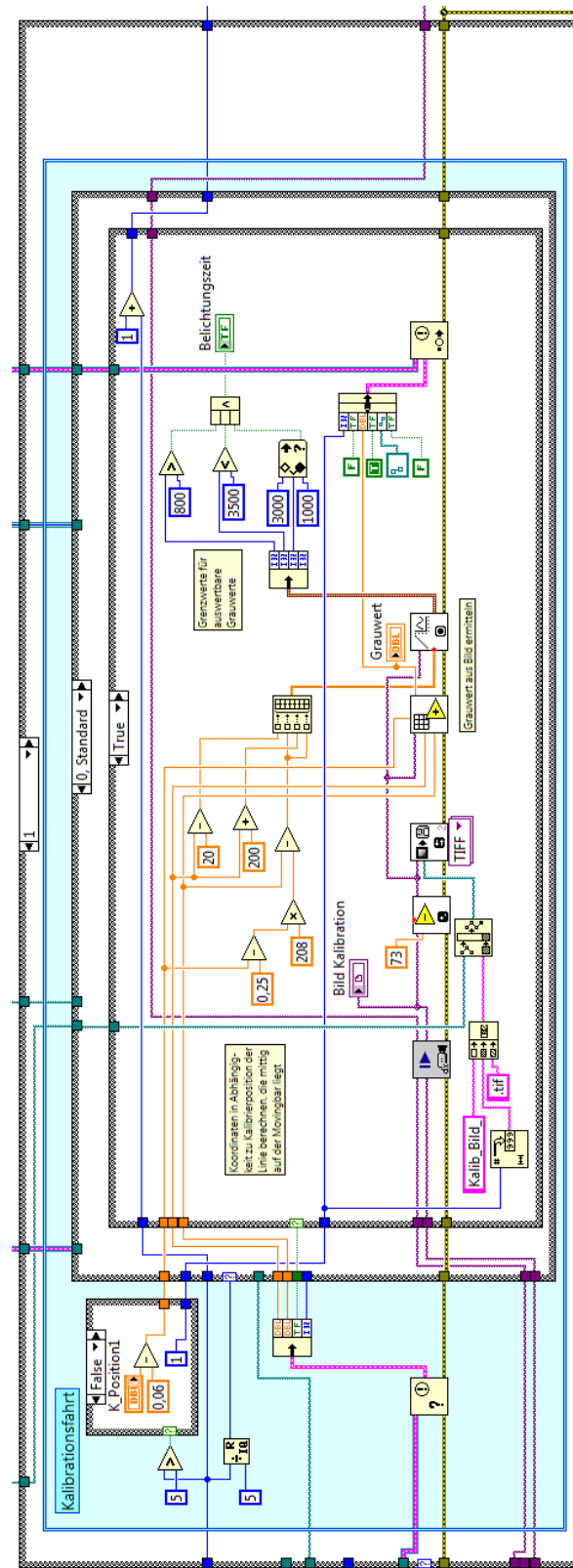


Abbildung A.13: Schleife 2, Fall: Kalibrationsfahrt, Case 0

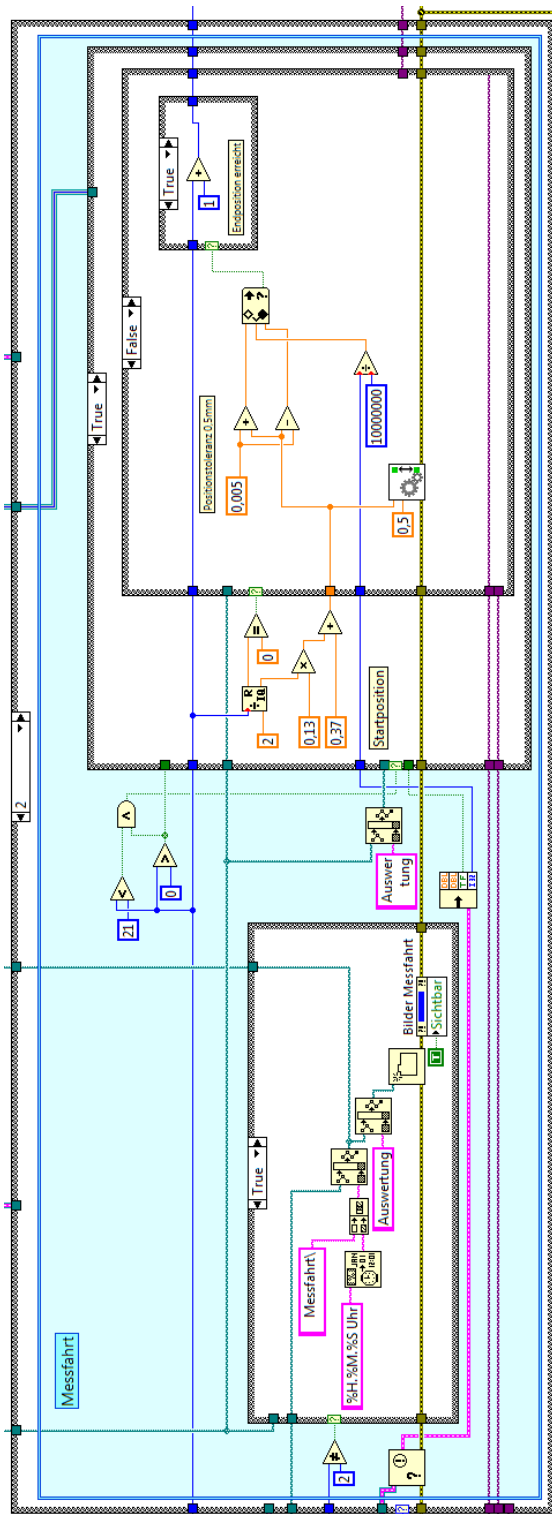


Abbildung A.14: Schleife 2, Fall: Messfahrt, 1

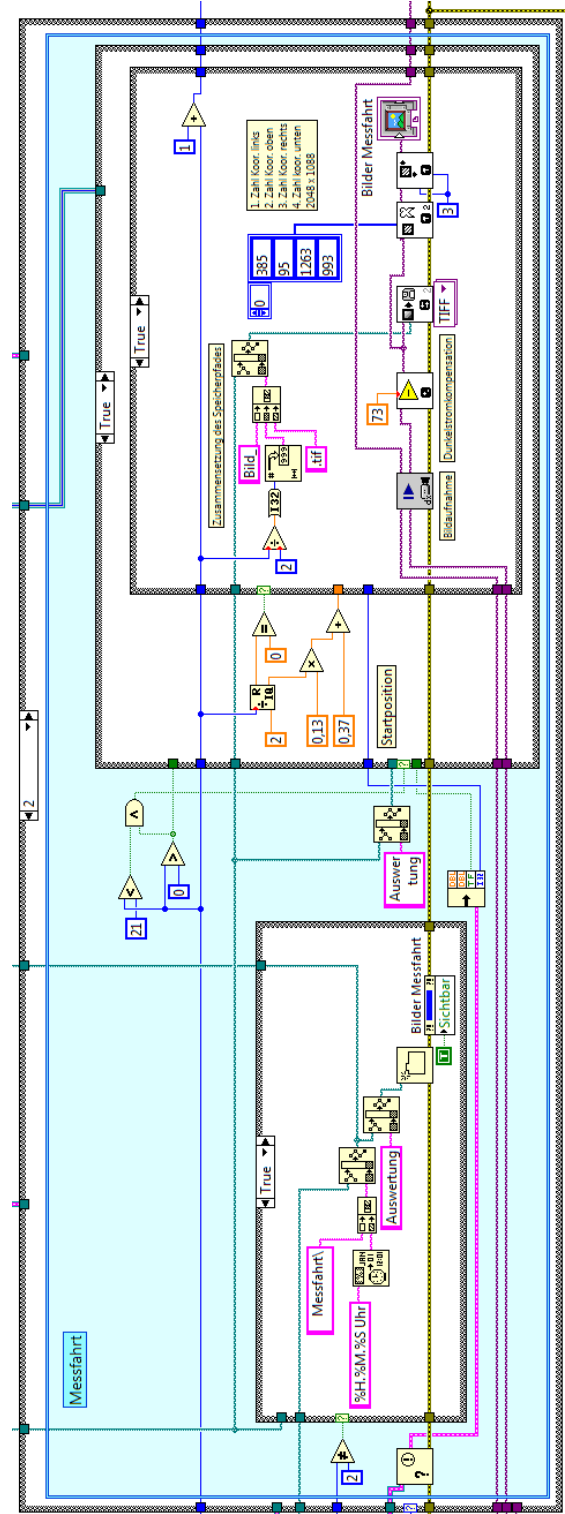


Abbildung A.15: Schleife 2, Fall: Messfahrt, 2

IX

A.1.2 Unterprogramme

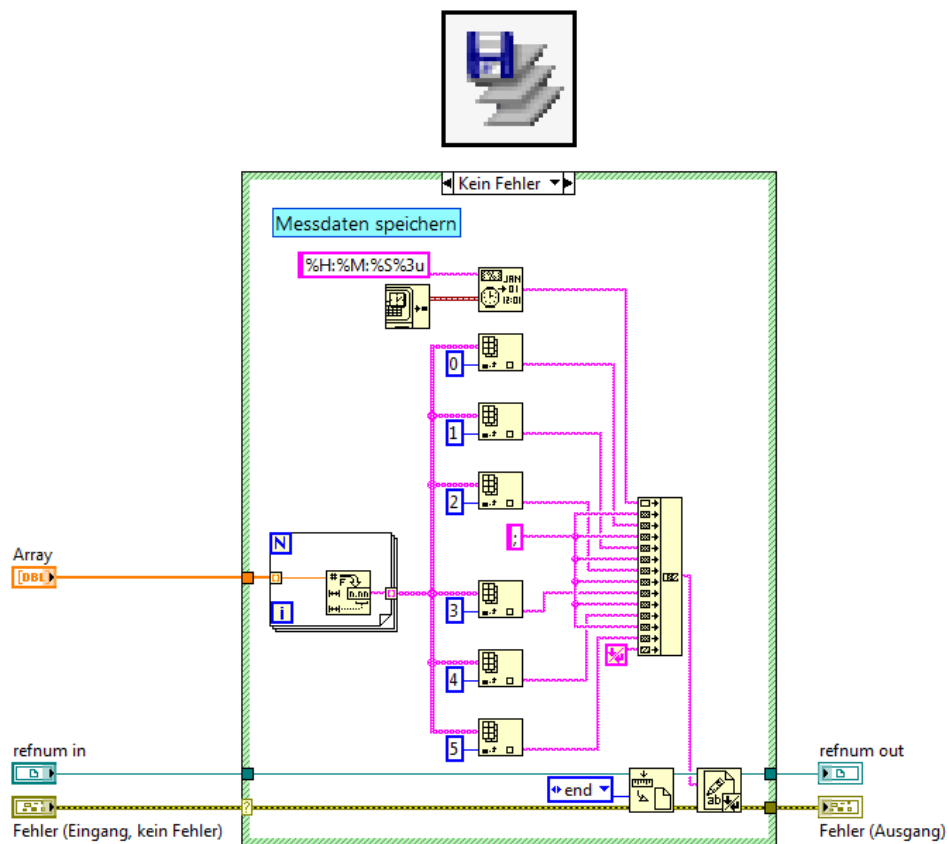


Abbildung A.18: Unterprogramm: Messdaten speichern

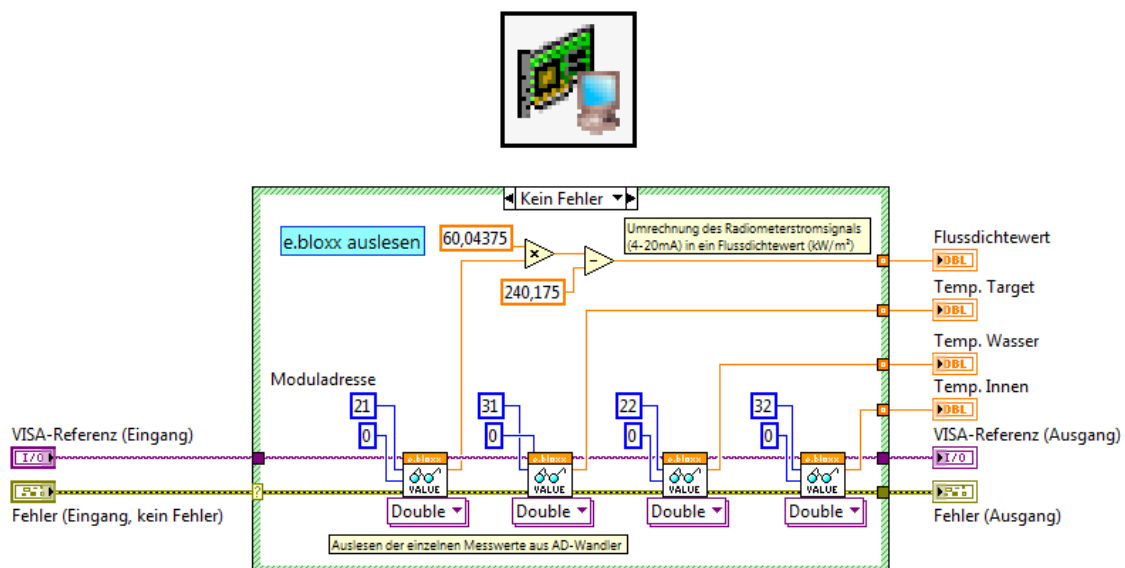


Abbildung A.19: Unterprogramm: e.bloxx auslesen

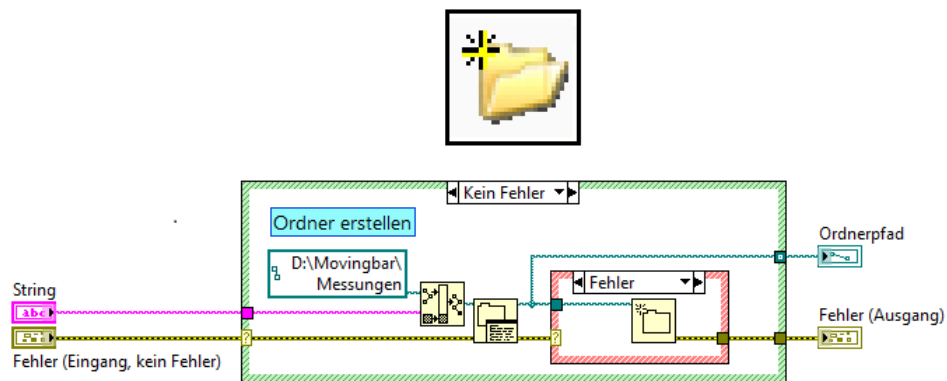


Abbildung A.20: Unterprogramm: Ordner erstellen

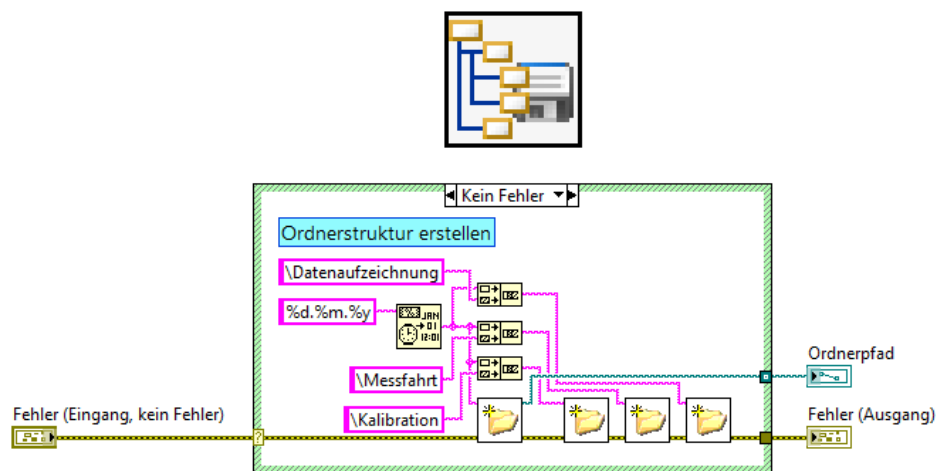


Abbildung A.21: Unterprogramm: Ordnerstruktur erstellen

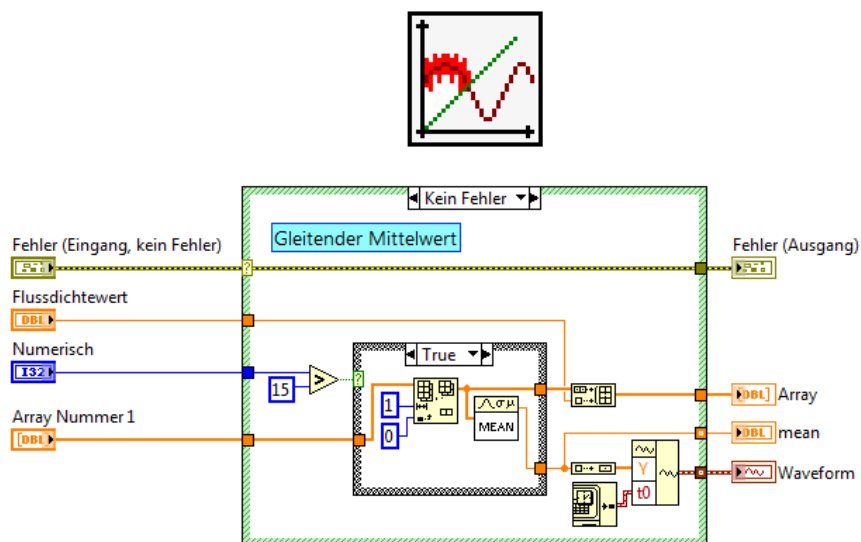


Abbildung A.22: Unterprogramm: Gleitender Mittelwert

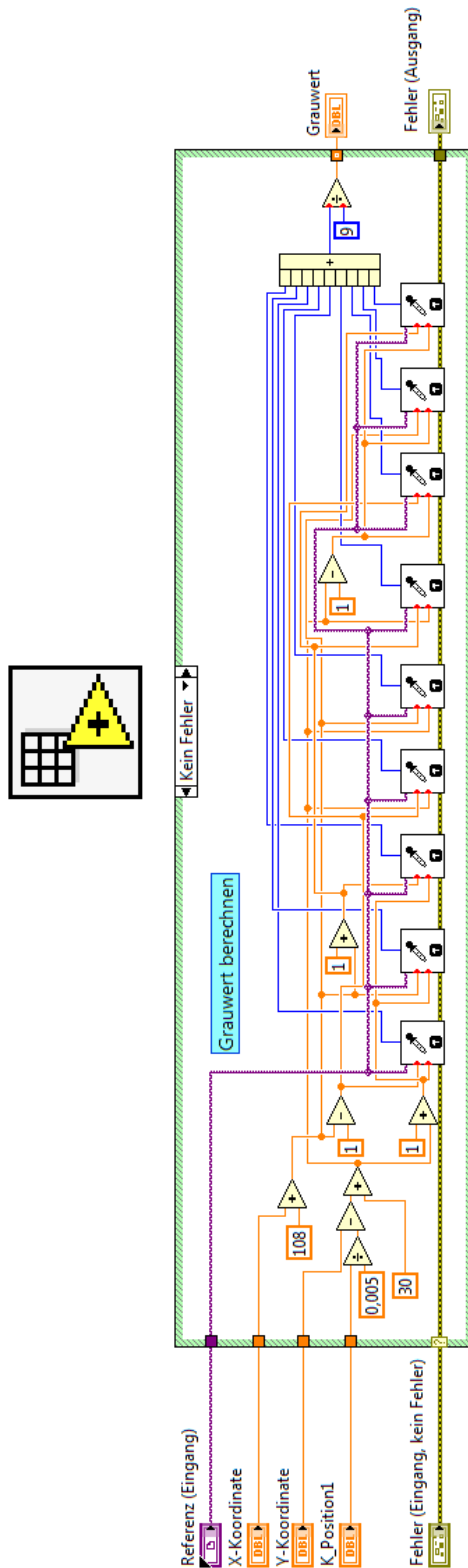


Abbildung A.23: Unterprogramm: Grauwert berechnen

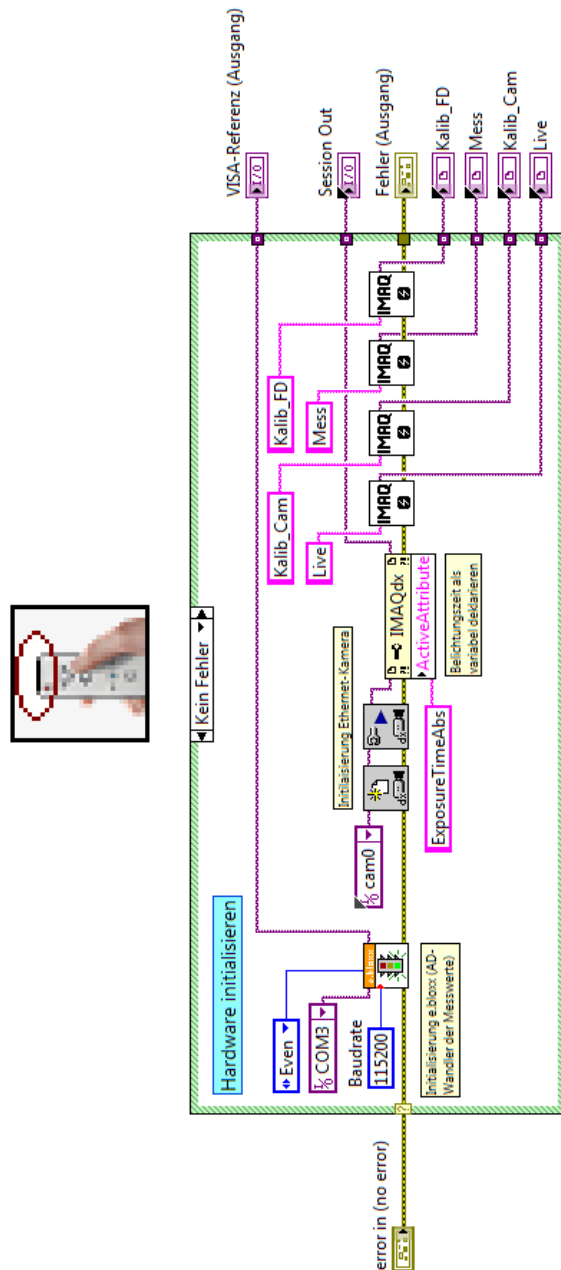


Abbildung A.24: Unterprogramm: Hardware initialisieren

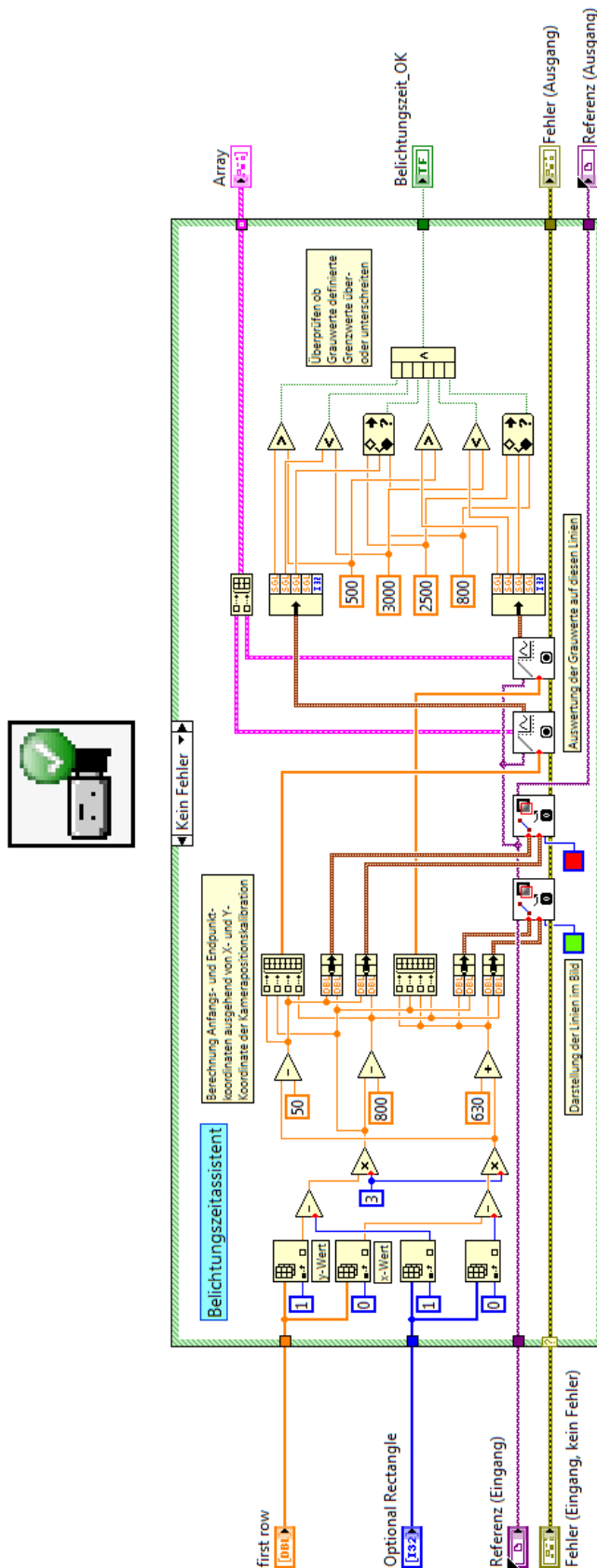


Abbildung A.25: Unterprogramm: Belichtungszeitassistent

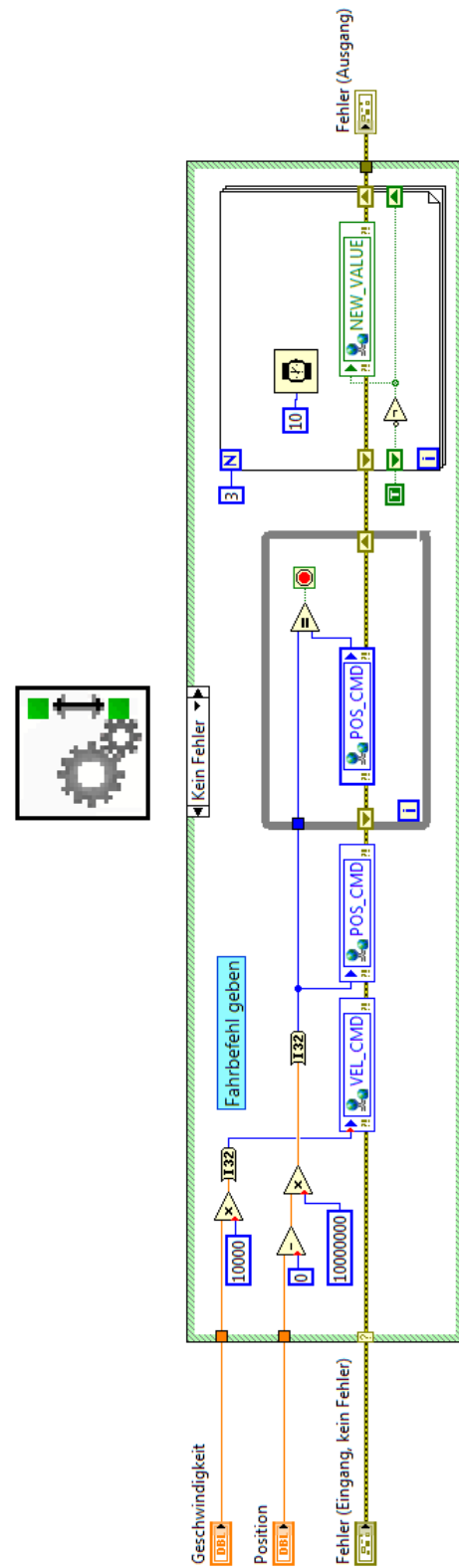


Abbildung A.26: Unterprogramm: Fahrbefehl geben

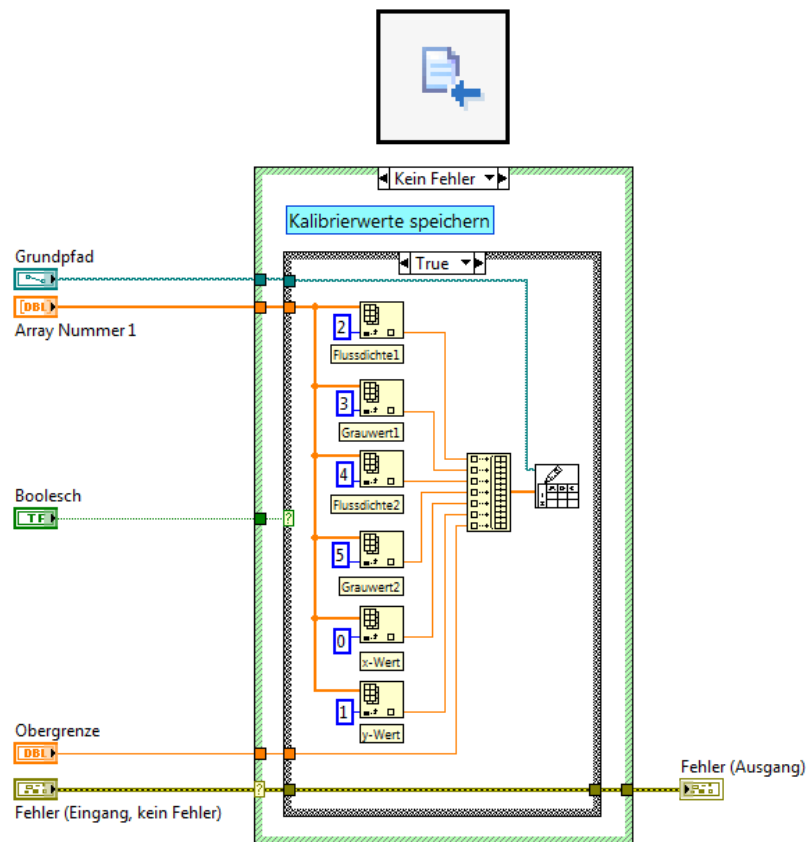


Abbildung A.27: Unterprogramm: Kalibrierwerte speichern

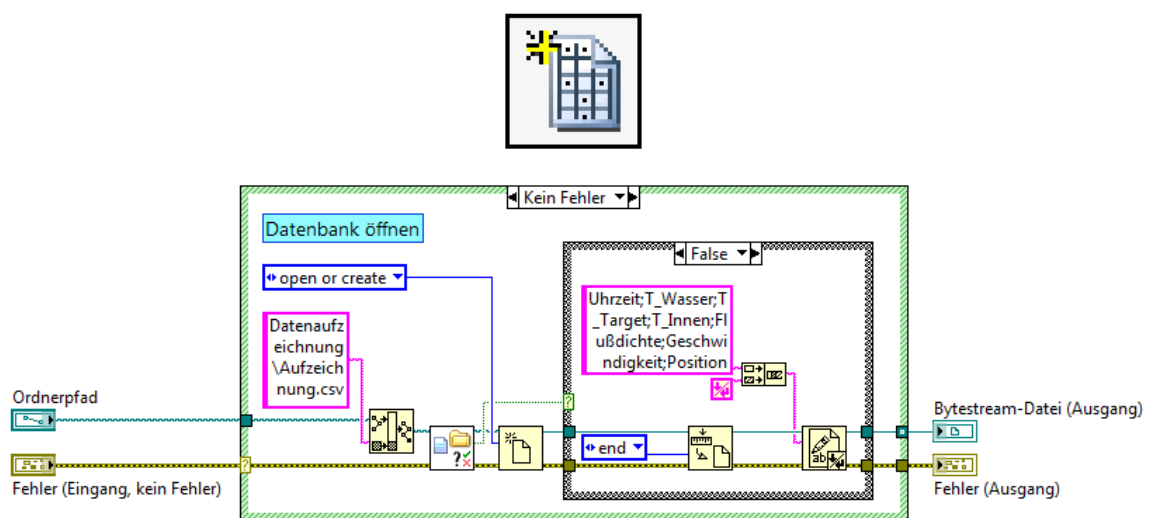


Abbildung A.28: Unterprogramm: Datenbank öffnen

A.2 Programmcode des Matlabalgorithmus

1	%% Auswertung der Movingbar-Flussdichtemessung	
2	% Algorithmus zur Auswertung der Bilder der zuletzt getätigten Messfahrt	
3	% der Movingbar auf der Forschungsebene des STU.	
4	% bei erneuten kompilieren: 1.	
5		
6	clear all	
7	close all	
8		
9	%% Ordner der letzten Messung und Kalibration suchen	% String mit Tagesdatum
10	tag=datestr(date, 'dd.mm.yy');	
11		
12	% Kalibrationsordner suchen	% Informationen aller Dateien aus dem Tagesordner
13	pfad_teil1=({'D:\Movingbar\Messungen\' tag 'Kalibration'});	
14	tagesdateien=dir(pfad_teil1);	% Namen der Ordner aus den Informationen entnehmen
15	anzahl_dateien=length(tagesdateien);	% Name des letzten Ordners speichern
16	ordner={tagesdateien.name};	
17	ordner_letzte_kalibration=ordner(anzahl_dateien);	
18	pfad_kalibrationsordner=[pfad_teil1 '\' ordner_letzte_kalibration];	
19		
20	% Messordner suchen	
21	pfad_teil1=({'D:\Movingbar\Messungen\' tag 'Messfahrt'});	% Informationen aller Dateien aus dem Tagesordner
22	tagesdateien=dir(pfad_teil1);	% Namen der Ordner aus den Informationen entnehmen
23	anzahl_dateien=length(tagesdateien);	% Name des letzten Ordners speichern
24	ordner={tagesdateien.name};	
25	ordner_letzte_messung=ordner(anzahl_dateien);	
26	pfad_messordner=[pfad_teil1 '\' ordner_letzte_messung];	
27	pfad_auswertungsordner=[pfad_messordner '\Auswertung'];	
28		
29	%% Kalibrationsfaktor berechnen	
30	kalibrationsdatei=fopen([pfad_kalibrationsordner '\Kalibrierwerte.txt']);	% Kalibrierwerte aus txt-file auslesen
31	kalibrierdaten=textscan(kalibrationsdatei, '%s');	
32	fclose(kalibrationsdatei);	% Einzelwerte entnehmen
33	flusddichte_1=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(1),' ','.'));	% (strrep: Komma durch Punkt ersetzen)
34	grauwert_1=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(2),' ','.'));	
35	flusddichte_2=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(3),' ','.'));	
36	grauwert_2=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(4),' ','.'));	
37		
38	% Mittelpunkt aus beiden Kalibrationspunkten	
39	k=(flusddichte_2/grauwert_2+flusddichte_1/grauwert_1)/2;	
40		
41	%% Kameraposition einlesen und verrechnen	% Breite des Testreceivers in Pixel
42	breite_receiver=189;	
43	kameraposition_x=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(5),' ','.'));	% Linker Rand des Testreceivers
44	kameraposition_y=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(6),' ','.'));	% Rechter Rand des Testreceivers
45	belichtungszeit=str2double(strrep(kalibrierdaten{1,1}(7),' ','.'));	% Unterer Rand der Movingbar im ersten Bild
46	x1=kameraposition_x;	% 27: Abstand in Pixel zwischen den Movingbars in den Bildern
47	x2=kameraposition_x+breite_receiver;	
48	y1=kameraposition_y;	
49	y2=kameraposition_y-27;	
50		

Abbildung A.29: Programmcode des Matlabalgorithmus Zeile 1-50

51	%% Bilder laden und zusammenfügen	
52	for i=0:9	
53	Bildnr=i+1;	
54	pfad_bild=([pfad_messordner '\Bild_' num2str(Bildnr) '.tif']);	
55	bild=imread(pfad_bild);	
56	diff=i*27;	% Laden des Bildes
57	zusammenschnitt(diff+1:diff+26,:)=flipud(bild(y2-diff:y1-diff,x1:x2));	% 27: Abstand in Pixel zwischen den Movingbars in den Bildern
58	end	% Zusammenbau Ausschnitte zu einer Fläche inkl. Spiegelung
59		
60	zusammenschnitt=flipud(zusammenschnitt);	% Horizontale Spiegelung
61	save([pfad_auswertungsordner '\Grauwertbild_mat.mat'],...;	% Speichern des zusammengefügteten Grauwertbildes
62	'zusammenschnitt', '-mat');	
63		
64	%% Bild umrechnen und auswerten	
65	% Überprüfung auf Überbelichtung	
66	if max(zusammenschnitt(:))==4096	
67	warnung_grauwert_bool=1;	
68	warnung_grauwert_text='NICHT OK';	
69	else	
70	warnung_grauwert_bool=0;	
71	warnung_grauwert_text='OK';	% Abfrage ob Grauwerte an der Obergrenze existieren
72	end	
73		
74	zusammenschnitt=zusammenschnitt*k;	
75	save([pfad_auswertungsordner '\Flussdichtebild_mat.mat'],...;	% Anwendung Kalibrationsfaktor
76	'zusammenschnitt', '-mat');	% Speichern des umgerechneten Flussdichtebildes
77	[max_wert position]=max(zusammenschnitt(:));	% Maximalen Flussdichtewert suchen
78	[max_wert y max_wert x]=ind2sub(size(zusammenschnitt),position);	% Koordinaten dieses maximalen Punktes ermitteln
79	[min_wert position]=min(zusammenschnitt(:));	% Minimalen Flussdichtewert suchen
80	[min_wert y min_wert x]=ind2sub(size(zusammenschnitt),position);	% Koordinaten dieses minimalen Punktes ermitteln
81	mittelwert=mean(zusammenschnitt(:));	% Mittlere Leistung in kW/m² berechnen
82	gesamtleistung=mittelwert*1.3*0.865;	% Gesamtleistung in kW auf gesamter Fläche (Höhe * Breite)
83		
84	%% Berechnete Daten in Textdatei schreiben	
85	textdatei=fopen([pfad_auswertungsordner '\Auswertungsdaten.txt'],'wt');	% Erstellen der Textdatei "Auswertungsdateien"
86	fprintf(textdatei,['Flussdichtemessung vom ' tag ' um ' ...	% Füllen der Textdatei mit berechneten Daten
87	ordner_letzte_messung '\n\nBelichtungszeit: ' ...	
88	num2str(belichtungszeit) ' ns -> ' warnung_grauwert_text '\n'...	
89	'Maximaler Flussdichtewert: ' num2str(max_wert) ' kW/m²\n'...	
90	'Minimaler Flussdichtewert: ' num2str(min_wert) ' kW/m²\n'...	
91	'Mittlerer Flussdichtewert: ' num2str(mittelwert,'%0.1f') ' kW/m²\n'...	
92	'Gesamtleistung: ' num2str(gesamtleistung,'%0.1f') ' kW'];	
93	fclose(textdatei);	
94		

Abbildung A.30: Programmcode des Matlabalgorithmus Zeile 50-94

95	<code>% Daten in Bild integrieren und abspeichern</code>	
96	<code>f=figure('Visible','off','PaperPositionMode','auto');</code>	% Nicht sichtbares Öffnen eines Grafikfensters
97	<code>get(f,'Position');</code>	
98	<code>set(f,'Position',[0 0 500 650]);</code>	% Feste Größe definieren
99	<code>subplot(6,1,[2 6])</code>	% Grafikfenster aufteilen in 2 Bereiche für Datenbox und Bild
100	<code>imshow(zusammenschnitt,'InitialMagnification','fit','Border','tight');</code>	% Einfügen des Bildes ins Grafikfenster
101	<code>colorbar; colormap(jet(128));</code>	% Legende einfügen und Falschfarbendarstellung aktivieren
102	<code>caxis auto;</code>	
103		
104	<code>% Markierung des maximalen Grauwerts</code>	
105	<code>if max_wert_x>=0.5*breite_receiver</code>	
106	<code>textposition=-30;</code>	
107	<code>else</code>	
108	<code>textposition=8;</code>	
109	<code>end</code>	
110	<code>text(max_wert_x,max_wert_y-3,'\times','FontSize',25,'HorizontalAlignment','center');</code>	
111	<code>text(max_wert_x+textposition,max_wert_y,'MAX','FontSize',13);</code>	
112		
113	<code>% Markierung des minimalen Grauwerts</code>	
114	<code>if min_wert_x>=0.5*breite_receiver</code>	
115	<code>textposition=-27;</code>	
116	<code>else</code>	
117	<code>textposition=8;</code>	
118	<code>end</code>	
119	<code>text(min_wert_x,min_wert_y-3,'\times','FontSize',25,'HorizontalAlignment','center');</code>	
120	<code>text(min_wert_x+textposition,min_wert_y,'MIN','FontSize',13);</code>	
121		
122	<code>% Integration der Datenbox oberhalb des Bildes</code>	
123	<code>subplot(6,1,1,'Visible','off')</code>	
124	<code>annotation('textbox',[.14,.795,.71,.175], 'String',...</code>	
125	<code>{'Flussdichtemessung Testreceiver'},...</code>	
126	<code>'FontSize',13,'BackgroundColor','w','FitBoxToText','off')</code>	
127	<code>annotation('textbox',[.14,.84,.732,.095], 'String',{...</code>	
128	<code>['tag: ' tag ' Uhrzeit: ' ordner_letzte_messung],...</code>	
129	<code>['Mittl. Flussdichte: ' num2str(mittelwert,'%0.1f') ' kW/m²'],...</code>	
130	<code>['Gesamtleistung: ' num2str(gesamtleistung,'%0.1f') ' kW'],...</code>	
131	<code>['Max. Flussdichte: ' num2str(max_wert) ' kW/m²'],...</code>	
132	<code>['Min. Flussdichte: ' num2str(min_wert) ' kW/m²'],...</code>	
133	<code>'FontSize',11,'BackgroundColor','w','FitBoxToText','off',...</code>	
134	<code>'EdgeColor','none','BackgroundColor','none')</code>	
135		
136	<code>% Integration der Warnung falls zu hohe Belichtungszeit</code>	
137	<code>if warnung_grauwert_bool==1</code>	
138	<code>annotation('textbox',[.14,.04,.71,.05], 'String',...</code>	
139	<code>{'Belichtungszeit verringern'},...</code>	
140	<code>'FontSize',14,'BackgroundColor','r','FitBoxToText','off')</code>	
141	<code>end</code>	
142		
143		
144	<code>saveas(f,[pfad auswertungsordner '\Auswertungsbild.png']);</code>	% Bild abspeichern

Abbildung A.31: Programmcode des Matlabalgorithmus Zeile 95-144

A.3 Datenblätter

A.3.1 Kamera: AVT Prosilica GT2000



Spezifikationen

Prosilica GT 2000	
Interface	IEEE 802.3 1000BASE-T, IEEE 802.3af (PoE)
Auflösung	2048 x 1088
Sensor	CMOSIS CMV2000
Sensortyp	CMOS Progressive
Sensorgroße	Type 2/3
Zellengroße	5.5 µm
Objektivanschluss	C (adjustable)
Maximale Framerate bei voller Auflösung	53.7 fps
A/D	12 Bit
On-board FIFO	128 MB
Output	
Farbtiefe	8/12 Bit
Mono-Modi	Mono8, Mono12, Mono12Packed
Farbmodi YUV	YUV411Packed, YUV422Packed, YUV444Packed
Farbmodi RGB	RGB8Packed, BGR8Packed, RGBA8Packed, BGRA8Packed
Raw Modi	BayerGB8, BayerGB12, BayerGB12Packed
General Purpose Inputs/Outputs (GPIOs)	
TTL I/Os	1 input, 2 outputs
Optogekoppelte I/Os	1 input, 2 outputs
RS-232	1
Betriebsbedingungen/Abmessungen	
Betriebstemperatur	-20°C ... +65°C
Spannungsversorgung (DC)	PoE, or 7-25 VDC
Leistungsaufnahme (12 V)	3.4 W @ 12 VDC
Masse	210 g
Abmessungen (L x B x H in mm)	86 x 53.3 x 33 mm (inkl. Anschlüsse)
Konformität	CE, FCC Class A, RoHS (2011/65/EU)

[Download Technische Zeichnung \(hier klicken\)](#)

Abbildung A.32: Datenblatt: AVT Prosilica GT2000 [34]

A.3.2 Radiometer: Sequoia TG1000-0


SEQUOIA

Basingstoke Road,
Spencers Wood,
Reading,
Berkshire
RG7 1PW
Tel: +44 (0) 118 976 9000
www.sequoia.co.uk

Certificate of Calibration

Customer:	DLR DEUTSCHES ZENTRUM
Model Number:	TG1000-0
Serial Number:	9825
Date Calibrated:	03-14-2013
Recalibration Due Date:	03-14-2014

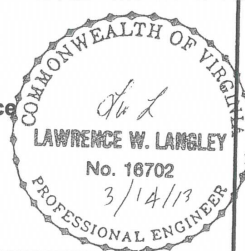
Thermogage Circular Foil Heat Flux Transducer

Sensor Scale Factor*:	9.84 W / cm ² / mV
Sensor Sensitivity*:	0.102 mV / W / cm ²
Sensor Range:	0 - 98 W / cm ²
Sensor Coating:	Zynolyte
Emissivity:	0.86 @ 2 microns
Resistance:	1 ohms
Ambient Temperature:	23°C
Humidity:	28%
Reference Pyrometer:	MI60 #5972; Cert. 4-28-12

*Scale factor and sensitivity are for incident radiant heat flux. The sensitivity is the reciprocal of the scale factor; both are provided here for convenience.

These calibrations were performed using instruments whose accuracy is traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST) and following procedure MAP002 as set in the Vatell Quality Assurance Manual.

Calibrated By: _____



E-MAIL: mki@vatell.com HOME PAGE: <http://www.vatell.com> FAX: (540) 953-3010 PHONE: (540) 961-3576
PO BOX 66, CHRISTIANSBURG, VA 24068 • 240 JENNELLE ROAD, CHRISTIANSBURG, VA 24073

Abbildung A.33: Datenblatt: Sequoia TG1000-0 [33]

ThermoTrans® A 20210

Temperatur-Meßumformer,
einstellbar

ThermoTrans® A 20210

Bestell-Nr. A 20210 P0

Temperatur-Meßumformer,
fest eingestellt

ThermoTrans® A 20210

Bestell-Nr. A 20210 P0 / 

Eingang/Sensortyp

Pt100 (-200 ... +850 °C)	P
Pt1000 (-200 ... +850 °C)	Q
Ni100 (-60 ... +180 °C)	N
TC / J (-210 ... +1200 °C)	J
TC / K (-200 ... +1372 °C)	K
TC / J (-210 ... +1200 °C), externe Vergleichsstellenkomp. (Pt100)	X
TC / K (-200 ... +1372 °C), externe Vergleichsstellenkomp. (Pt100)	Y
U (-1000 mV ... +1000 mV)	U

Meßbereichsanfang

[illegible]

Meßbereichsende

Vorzeichen + oder -	X								
Zahlenwert 4stellig ($^{\circ}\text{C}$ / mV)	X	X	X	X	X				

Ausgang

0 ... 20 mA	A
4 ... 20 mA	B
0 ... 10 V	C
0 ... 5 V	D

Beispiel fest eingestellter Typ:

[illegible]

Zubehör

Bestell-Nr.

Hutschienen-Busverbinder
ZU 0628

Hilfsenergiebrückung für je zwei Trenner A 20XXX P0 bzw.
P 32XXX P0

ZU 0628

IsoPower® A 20900

Stromversorgung 24 V DC, 1 A, siehe Seite 212

A 20900 H4

Hutschienen-Busverbinder
ZU 0678

Entnahme der Versorgungsspannung (A 20900), Weiterleitung an
Hutschienen-Busverbinder ZU 0628

ZU 0678

Einspeiseklemme ZU 0677

Einspeisung der Versorgungsspannung 24 V DC in
Hutschiene-Busverbinder ZU 0628

ZU 0677

Anreihgehäuse

ThermoTrans® A 20210

Fortsetzung Technische Daten

Shuntspannungen Eingangsdaten

Eingang	-1000 ... 1000 mV unipolar/bipolar
Eingangswiderstand	>10 MOhm
Eingangsfehlergrenzen	$\pm (200 \mu\text{V} + 0,05 \% \text{ v. M.})$ für Meßspannen >50 mV
Leitungsüberwachung	Leitungsbruch
Temperaturkoeffizient am Eingang	<50 ppm/K vom parametrisierten Meßbereichsendwert (mittlerer TK im zulässigen Betriebstemperaturbereich, Referenztemperatur 23 °C)
Überlastbarkeit	5 V zwischen allen Eingängen

Ausgangsdaten

Ausgänge	0 ... 20 mA, kalibriert umschaltbar 4 ... 20 mA, (Werkseinstellung 4 ... 20 mA) 0 ... 5 V, 0 ... 10 V
Aussteuerbereich	0 ... $\approx 102,5 \%$ der Meßspanne bei 0 ... 20 mA, 0 ... 10 V bzw. 0 ... 5 V Ausgang -1,25 ... $\approx 102,5 \%$ der Meßspanne bei 4 ... 20 mA Ausgang
Auflösung	16 bit
Bürde	Stromausgang: $\leq 10 \text{ V}$ ($\leq 500 \text{ Ohm}$ bei 20 mA) Spannungsausgang: $\leq 1 \text{ mA}$ ($\geq 10 \text{ kOhm}$ bei 10 V)
Ausgangsfehlergrenzen	Stromausgang: $\pm (10 \mu\text{A} + 0,05 \% \text{ v. M.})$ Spannungsausgang: $\pm (5 \text{ mV} + 0,05 \% \text{ v. M.})$
Restwelligkeit	<10 mV _{eff}
Temperaturkoeffizient am Ausgang	<50 ppm/K v. E. (mittlerer TK im zulässigen Betriebstemperaturbereich, Referenztemperatur 23 °C)
Fehlersignalisierung	0 ... 20 mA Ausgang: $I = 0 \text{ mA}$ oder $\geq 21 \text{ mA}$ 4 ... 20 mA Ausgang: $I \leq 3,6 \text{ mA}$ oder $\geq 21 \text{ mA}$ 0 ... 5 V bzw. 0 ... 10 V Ausgang: $U = 0 \text{ V}$ oder $U \geq 5,25 \text{ V}$ bzw. $U \geq 10,5 \text{ V}$ über Ausgangssignal und rote LED für Meßbereichsüber- und -unterschreitung, Fehlparametrierung, Sensor-Kurzschluß und Leitungsbruch, Ausgangsfehler Bürde, weitere Gerätefehler. Siehe auch Fehlersignalisierung auf Seite 171.

Übertragungsverhalten

Kennlinie	linear steigend / fallend
Meßrate	ca. 3/s *)

*) Bei Thermoelementen mit externer Vergleichsstellenkompensation: Meßrate 2/s.

Abbildung A.35: Datenblatt: Knick ThermoTrans A 20210 Seite 2 [15]

A.3.4 Messmodul: Gantner Instrumenten e.bloxx A1-1

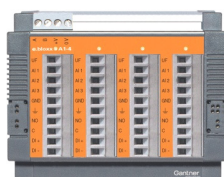


e.bloxx A1

Universelles Messmodul



e.bloxx A1-1



e.bloxx A1-4

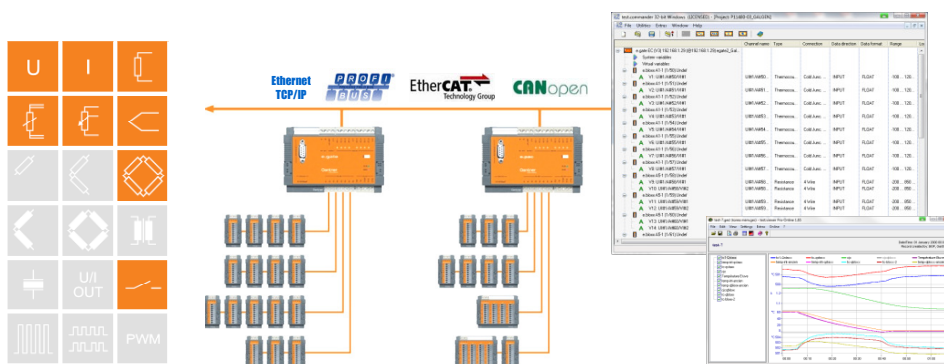
Die Produktreihe e.bloxx ist für die industrielle und experimentelle Prüftechnik, besonders für das Messen von elektrischen, thermischen und mechanischen Größen in Motor- und Komponentenprüfständen konzipiert.

Die klare modulare Struktur und die Vielfalt von Anschlussmöglichkeiten zeichnen die Module aus. Durch die schnelle und präzise Signalkonditionierung mit bis zu 1000 Samples/s bei einer Auflösung von 19 bit, stellen sie zuverlässig hochwertige Messergebnisse zur Verfügung. Standardisierte Schnittstellen erlauben den Aufbau von Netzwerken.

Mit den Test Controllern lassen sich durch Datenoptimierung sehr hohe Datenraten über Ethernet, Profibus-DP, EtherCAT und CANopen realisieren. Die PAC-Funktion (Programmable Automation Controller) optimiert die Einsatzmöglichkeit des Systems durch umfangreiche Konditionierungs- und Steuerungsmöglichkeiten. Eine offene Struktur erlaubt ein Einbinden in vorhandene Systeme.

Die wichtigsten Fakten:

- **Genauigkeitsklasse 0,01**
- **1 oder 4 universelle analoge Eingangskanäle**
Spannung, Strom, Widerstand, Potentiometer, Pt100, Pt1000, Thermoelemente, Messbrücken
- **Hochauflösende Digitalisierung**
19 bit ADU, 1000 Hz Abtastrate
- **1 digitaler Eingang pro Kanal**
Status, Tara, Speicher rücksetzen
- **1 Relaisausgang (MOSFET) pro Kanal**
Staus, Alarm, Grenzwert, Toleranzband
- **Signalkonditionierung**
Linearisierung, digitales Filter, Mittelwert, Skalierung, Min-/Max-Speicher, Arithmetik, Alarm
- **RS 485 Feldbus Schnittstelle**
Profibus-DP, Modbus-RTU, ASCII und an alle e.series Test Controller anschließbar
- **Galvanische Trennung**
von I/O-Signalen, Versorgung und Schnittstelle
Isolationsspannung 500 VDC
- **Elektromagnetische Verträglichkeit**
gemäß EN 61000-4 und EN 55011
- **Versorgung 10...30 VDC**
- **Montage auf Tragschiene nach EN 50022**



Gantner Instruments Test & Measurement GmbH ■ www.gantner-instruments.com ■ office@gantner-instruments.com
 Silvrettastraße 13 6780 Schruns / Austria T +43 (0) 5556 77463-0 F +43 (0) 5556 77463-300
 Heidelberger Landstraße 74 64297 Darmstadt / Germany T +49 (0) 6151 95136-0 F +49 (0) 6151 95136-26

Abbildung A.36: Datenblatt: Gantner Instrumenten e.bloxx A1-1 Seite 1 [13]

e.bloxx A1 Technische Daten

Analoger Eingang

Genauigkeit	0,01 % typisch 0,02 % in beherr. magn. Umgebung ¹ 0,05 % im industriellen Bereich ² 0,003 % typisch (innerhalb 24 h)		
Wiederholpräzision			
Messart	Bereich	Genauigkeit	Auflösung
Spannung	±10 V	±2 mV	40 µV
	±1 V	±0,2 mV	4 µV
	±100 mV	±20 µV	0,4 µV
	±10 mV	±10 µV	0,04 µV
Strom (interner Shunt 100 Ω)	4-20 mA	±4 µA	80 nA
	±20 mA	±4 µA	80 nA
Widerstand (2-, 3- und 4-Leiter)	4 kΩ	±1 Ω	0,05 Ω
	2 kΩ	±0,6 Ω	0,03 Ω
Potentiometer Zulässiger Widerstandsbereich		1 kΩ bis 10 kΩ	
RTD (2-, 3- und 4-Leiter)			
	Pt100 (-200 bis +850 °C)	±0,5 °C	0,1 °C
	Pt100 (-200 bis +250 °C)	±0,2 °C	0,01 °C
	Pt1000 (-200 bis +850 °C)	±1 °C	0,1 °C
	Pt1000 (-200 bis +140 °C)	±0,3 °C	0,01 °C
Thermoelemente			
	Typ B	besser als ±5 °C	
	Typ E, J, K, L, T, U	besser als ±1 °C	
	Typ N	besser als ±2 °C	
	Typ R, S	besser als ±3 °C	
Brücke (Speisung 5 VDC/120Ω)	±1000 mV/V	±1 mV/V	50 µV/V
	±200 mV/V	±200 µV/V	10 µV/V
	±20 mV/V	±20 µV/V	1 µV/V
	±8 mV/V	±8 µV/V	0,4 µV/V
	±2 mV/V	±2 µV/V	0,1 µV/V
Eingangswiderstand	> 100 MΩ		
Zul. Gleichtaktspannung	500 V permanent		
Linearitätsabweichung	0,01 % vom Endwert		
Signal-/Rauschverhältnis	Messart Spannung		
	1 kHz	90 dB	
	1 Hz	120 dB	
Temperatureinfluss			
	auf Nullpunkt	1 µV / 10 K	
	auf Empfindlichkeit	0,02 % / 10 K	
Langzeitdrift			
		1 µV / 24 h; 0,1 µA / 24 h	
		2,5 µV / 8000 h; 0,25 µA / 8000 h	

Analog/Digital-Umsetzung

Auflösung	19 bit
Wandelrate	1000 / s bei Spannung, Strom
	Potentiometer, Brücke
	10 / s bei Widerstand, RTD,
	5 / s bei Thermoelementen
	Sigma-Delta
Wandelverfahren	Anti-Aliasing Bessel TP 4. Ord. 200 Hz
Filter	variables digitales TP-Filter 1. Ordnung
	Mittelwertbildung, gleitender MW

¹ gemäß EN 61326: 1997, Anhang B² gemäß EN 61326: 1997, Anhang A

Digitale Ein-/Ausgänge

Eingang	Status, Tara, Rücksetzen
Eingangsspannung	max. 30 VDC
Eingangsstrom	max. 1,5 mA
obere Schaltschwelle	> 10 V (high)
untere Schaltschwelle	< 2,0 V (low)

Ausgang	Relaisausgang
Kontakt	Opto – MOSFET
Belastbarkeit	60 VDC / 100 mA (ohmsche Last)
Isolationsspannung	500 V

Kommunikationsschnittstelle

Standard	RS 485, 2-Leiter
Datenformat	8E1
Protokolle	ASCII, Modbus-RTU, Profibus-DP Local-Bus
Baudraten	
ASCII und ModBus-RTU	19,2; 38,4; 57,6; 93,75; 115,2 kBaud
Profibus-DP	19,2; 93,75; 187,5; 500; 1500 kBaud
Local-Bus	19,2; 38,4; 57,6; 93,75; 115,2; 187,5; 500; 1500 kBaud
Anzahl der Geräte am Bus	max. 32
Isolationsspannung	500 V

Versorgung

Versorgungsspannung	10 bis 30 VDC Überspannungs- und Verpolungsschutz
Leistungsaufnahme	
e.bloxx A1-1	ca. 1,5 W
e.bloxx A1-4	ca. 6 W
Einfluss der Spannung	0,001 %/V

Gehäuse

Material	Aluminium und ABS
Abmessungen (B x H x T) und Gewicht	
e.bloxx A1-1	(45 x 90 x 83) mm, 160 g
e.bloxx A1-4	(104 x 90 x 83) mm, 500 g
Schutzart	IP20
Montageart	DIN EN-Tragschiene

Umgebungsbedingungen

Betriebstemperatur	-20 °C bis +60 °C
Lagertemperatur	-40 °C bis +85 °C
Relative Luftfeuchtigkeit	5 % bis 95 % bei 50 °C nicht kondensierend

Gültigkeit der Angaben

Alle Angaben sind gültig nach einer Aufwärmzeit von 45 Minuten.

Gültig ab November 2010. Technische Änderungen vorbehalten

DB_EBLOXX_A1_D_20.doc

Gantner Instruments Test & Measurement GmbH ■ www.gantner-instruments.com ■ office@gantner-instruments.com
 Silvertastraße 13 6780 Schruns / Austria T +43 (0) 5556 77463-0 F +43 (0) 5556 77463-300
 Heidelberger Landstraße 74 64297 Darmstadt / Germany T +49 (0) 6151 95136-0 F +49 (0) 6151 95136-26

Abbildung A.37: Datenblatt: Gantner Instrumentenmts e.bloxx A1-1 Seite 2 [13]

A.3.5 Kameragehäuse: Videotec Verso

2014/10/13

VERSO

VERSO
POLYKARBONAT GEHÄUSE MIT SEITENÖFFNUNG

TECHNISCHE DATEN

ALLGEMEINES

Hergestellt aus hochfestem Technopolymer (Polykarbonat)
Sonnenschutzdach aus ABS
Farbe RAL9002
Externe Schrauben aus rostfreiem Stahl

MECHANIK

Kabelverschraubungen: 3xM16
Polykarbonat-Fenster (WxH): 105x64mm
Innere Nutzabmessungen (WxH): 70x70mm
Innere Nutzlänge (mit oder ohne Zubehör): 270mm
Einheitsgewicht: 1.5kg

ELEKTRIK

Versorgungsspannung/Stromaufnahme (leere Version):
• Von 12Vdc bis 24Vdc, 1A max
• Von 12Vac bis 24Vac, 1A max, 50/60Hz
• Von 120Vac bis 230Vac, 400mA max, 50/60Hz

Versorgungsspannung/Stromaufnahme (Ausführung mit Heizung, Ton 15°C±3°C, Toff 22°C±3°C):

- Von 12Vdc bis 24Vdc, 5A max
- Von 12Vac bis 24Vac, 5A max, 50/60Hz
- Von 120Vac bis 230Vac, 700mA max, 50/60Hz

Versorgungsspannung/Stromaufnahme (Ausführung mit Lüfter im Dauerbetrieb für Heizungshilfe):

- 12Vdc, 400mA max
- 24Vac, 200mA max, 50/60Hz
- Von 100Vac bis 240Vac, 40mA max, 50/60Hz (mit Wide-range Netzteil)

Versorgungsspannung/Stromaufnahme (Version mit Lüfter und Thermostat mit Doppelfilter für Luftwechsel, Ton 35°C±3°C, Toff 20°C±3°C):

- 12Vdc, 400mA max
- 24Vac, 200mA max, 50/60Hz

Kameranetzteil:

- V_{in} von 100Vac bis 240Vac, 50/60Hz
 V_{out} 12Vdc, 1A
- V_{in} 230Vac, 50/60Hz
 V_{out} 24Vac, 400mA, 50/60Hz

UMGEBUNG

Innen/Außen

Betriebstemperatur (mit Heizung): Von -20°C bis +60°C

Chemikalienbeständigkeit

- Hohe Beständigkeit: Basen, Alkohol, Gas, Kohlenwasserstoffe
- Gute Beständigkeit: Organische Säuren, Anorganische Säuren, Öle
- Geringe Beständigkeit: Lösungsmittel



VERSO COMPACT



VERSO + KAMERA



AUSFÜHRUNG MIT KÜHLSYSTEM

VERFÜGBARE MODELLE						
Code	Sonnen- schutzdach	Heizung 120Vac/230Vac	Heizung 12Vdc/24Vac	12Vdc- Lüfter mit doppeltem Luftfilter für Luftwechsel	24Vac- Lüfter mit doppeltem Luftfilter für Luftwechsel	Maximaler Verbrauch
HPV42K0A000	✓	–	–	–	–	–
HPV42K1A000	✓	✓	–	–	–	40W
HPV42K2A000	✓	–	✓	–	–	20W
HPV42K2A016	✓	–	✓	–	✓	24W
HPV42K2A017	✓	–	✓	✓	–	24W



Technische Daten können ohne Vorankündigung geändert werden. © Videotec S.p.A. Alle Rechte vorbehalten.

Abbildung A.38: Datenblatt: Videotec Verso [35]

A.3.6 Pumpe: Comet GIRO 24V

COMET-Pumpen

Systemtechnik GmbH & Co. KG
Industriestraße 5
37308 Pfaffschwende

Telefon +49 (0) 3 60 82/4 36-0

Telefax +49 (0) 3 60 82/4 36 34

E-Mail: kontakt@comet-pumpen.de

Internet: http://www.comet-pumpen.de



Inline-Pumpen / inline pumps

GIRO 24V

Artikel: 1255.79.00

Inline-Pumpe GIRO 24V

inline pump GIRO 24V

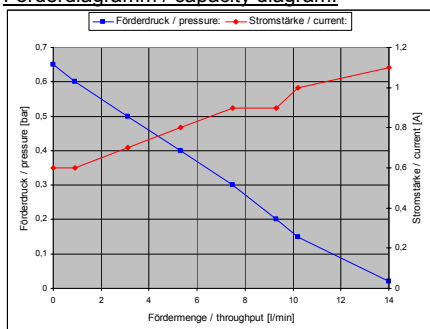


Spannung / voltage:	24 Volt = / 24 volt DC
Stromstärke / current:	max. 1,1 A
Fördermenge / throughput:	max. 14 l/min
Förderhöhe / delivery height:	max. 6,5 m
Förderdruck / pressure:	max. 0,65 bar / 9,5 psi
Verbrauch / power:	10 - 30 Watt
Ø / Höhe / diam. / height:	55 / 126 mm
Kabellänge / wire length:	1 m
Anschluss / connection:	(+) braun / brown (-) blau / blue

- nicht selbstansaugend
- trockenlaufsicher bis 2 Stunden
- dauerlauffähig
- Laufzeit bei Betrieb mit 12V ca. 1000 h, sonst 500 h
- zur Förderung von sauberem Wasser bis max. 60°C, inklusive Trinkwasser
- für Schläuche mit 10 mm Innendurchmesser
- erweiterbar mit Rückschlagventil und Filter
- andere Kabellängen auf Anfrage lieferbar

- don't start to suck
- run dry up to 2 h without damage
- suitable for continuous operation
- running time 1000 h when operating with 12V, otherwise 500 h
- for supply of clean water up to 60°C, including drinking water
- for hoses with 10 mm inner diameter
- expandable with non-return-valve and filter
- other cable length available on request

Förderdiagramm / capacity diagram:



Varianten / variants:

Zubehör / accessories:



Schlauchstutzen /
hose clip
C1.0608.02



Rückschlagventil /
non-return-valve
3004.02.00



Filter
3006.01.00

Abbildung A.39: Datenblatt: Comet GIRO 24V [36]

A.3.7 Durchflusssensor: Gentech FCS-03

Gentech
SWITCHING AND SENSING SOLUTIONS
GENTECH INTERNATIONAL LTD



Grangestone Industrial Estate
Girvan, Ayrshire KA26 9PS
United Kingdom

Telephone: +44 1465 713581
Fax: +44 1465 714974

E-Mail: info@gentechsensors.com
Web Site www.gentechsensors.com

FLOW SWITCH

FCS Series - Flow Switch in Polyphenelene

FCS-03

Design Features

- Polyphenelene Material
- Minimal pressure drop
- Operates from a small head of water
- Mount in any axis
- Suitable for water and air flow switching



Product Comments

- 3/8 inch BSP male threaded fittings
- Suitable for hot and cold potable water
- Reed Switch reliability
- Food grade material
- Easy installation

Typical Applications

- Boiling Water
- Circulating Pump Protection
- Central Heating Systems
- Flow sensing
- Cooling systems

Material, Design and Operation

Mounting:	Flow Switch Vertical or Horizontal
Material:	Polyphenelene
Fitting	Flow Switch 3/8"BSP
Contact Form:	Form A -SPST
Contact Material:	Ruthenium
Maximum Watts	15 Watts
Maximum Switching Volts:	250 VAC
Maximum Switching Current:	1.0 A
Cable Type:	2 x 22AWG, 16/0.2mm PVC insulated 0.5m long to UL/CSA/BS6361
Cable Colour:	Black/Black
Operating Temperature Range:	100 °C
Medium/Liquid:	Fuels & Oils , Solvents, Organic , Boiling Water , Acids, Organic , Drinking Water (Potable Water) , Deionised Water , Acids, Inorganic , Alcohols , Water
Flow Rate:	0.5 litres/min
Operating Pressure:	10 BAR
Mounting Shock:	50g for 11ms duration
Mounting Vibration:	35g up to 500Hz
Approvals:	Meets UL 94-HB flammability rating

2005/24

Abbildung A.40: Datenblatt: Gentech FCS-03 [37]